

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA
Y GEOGRÁFICAS**

EAP. DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

**Dispersión geoquímica secundaria de los principales
elementos lantánidos en la cuenca de los ríos Chancay-
Lambayeque**

TESIS

para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo

AUTOR

Luis Enrique Vargas Rodríguez

Lima – Perú

2007

Este trabajo va dedicado:

A mis padres Teresa y Alejandro,
pilares importantes de mi vida,
que siempre me guiaron y
apoyaron.

A Elizabeth, fuente de inspiración
diaria y lealtad incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), por haberme dado la oportunidad de realizar una de las más importantes metas a nivel profesional.

A los Ingenieros: Jorge Chira Fernández, Hugo Rivera Mantilla y María Lau por el apoyo, tiempo y sugerencias para llevar adelante esta investigación.

A los Ingenieros: Renato Chero, Raymond Rivera y Keller Guerra por su apoyo en la elaboración GIS.

A mis compañeros de la Dirección de Recursos Minerales y Energéticos de INGENMET, quienes siempre estuvieron dispuestos a compartir sus conocimientos y experiencias, a todos ellos mis mejores deseos.

ÍNDICE

RESUMEN	I
AGRADECIMIENTOS	II
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1.1 Marco Teórico	
1.1.2 Planteamiento del problema	
1.1.3 Objetivos	
1.1.4 Hipótesis de la investigación	
1.1.5 Justificación de la investigación	
1.2 GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO	3
1.2.1 Ubicación	
1.2.2 Clima	
1.2.3 Fisiografía	
1.2.4 Hidrografía	
CAPÍTULO II: MARCO GEOLÓGICO	8
2.1 ESTRATIGRAFÍA	8
2.1.1 Triásico superior- Cretáceo superior	8
2.1.1.1 Formación La Leche	
2.1.1.2 Volcánicos Oytún	
2.1.1.3 Formación Tinajones	
2.1.1.4 Grupo Goyllarisquizga	
2.1.1.5 Formación Inca	
2.1.1.6 Formación Chúlec	
2.1.1.7 Formación Pariatambo	
2.1.1.8 Grupo Pulluicana	
2.1.1.9 Grupo Quillquiñan	
2.1.1.10 Formación Cajamarca	
2.1.1.11 Formación Celendín	
2.1.1.12 Formación Chota	
2.1.2 Paleógeno – Neógeno	16
2.1.2.1 Grupo Calipuy	
a) Volcánico Llama	
b) Volcánico Porculla	
2.1.2.2 Volcánico Huambos	
2.1.2.3 Depósitos Cuaternarios Recientes	

2.2 ROCAS ÍNTRUSIVAS	18
2.2.1 Batolito de la Costa	18
2.2.2 Franja Intrusiva de la Cordillera Occidental	20
CAPÍTULO III: GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	21
3.1 DESARROLLO ESTRUCTURAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	23
CAPÍTULO IV: ASPECTOS METALOGENÉTICOS	29
4.1 PROVINCIA METALOGENÉTICA DE AG, AU Y POLIMETÁLICOS DE LA FRANJA VOLCÁNICA CENOZOICA DE LA CORDILLERA OCCIDENTAL	29
CAPÍTULO V: ELEMENTOS LANTÁNIDOS	34
5.1 UBICACIÓN EN EL SISTEMA PERIÓDICO	35
5.2 INCLUSIÓN DEL ITRIO Y ESCANDIO	35
5.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS	36
5.4 DIVISIÓN DE LOS ELEMENTOS LANTÁNIDOS	36
5.5 CARÁCTER GEOQUÍMICO DE LOS ELEMENTOS LANTÁNIDOS	38
5.6 PRODUCCIÓN, RECURSOS Y APLICACIONES ECONÓMICAS DE LAS TIERRAS RARAS A NIVEL MUNDIAL	44
CAPÍTULO VI: METODOLOGÍA DE TRABAJO	47
6.1 PROSPECCIÓN GEOQUÍMICA REGIONAL DE SEDIMENTOS	47
6.2 MUESTREO DE SEDIMENTOS ACTIVOS DE QUEBRADA	47
6.3 PROCEDIMIENTOS ANALÍTICOS	53
6.3.1 Ataque Químico	
6.3.2 Métodos analíticos	
CAPÍTULO VII: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	57
7.1 ESTADÍSTICA DEL ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD	57
7.1.1 Precisión	
7.1.2 Exactitud	
7.1.3 Contaminación	
7.2 GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS LANTÁNIDOS	65
7.2.1 Procesamiento Estadístico	65

7.2.2	Parámetros Geoquímicos	77
7.2.3	Índices de Correlación Bivarial	78
7.2.4	Análisis de Componentes Principales (ACP)	80
7.2.4.1	Definición de la matriz de correlaciones	
7.2.4.2	Obtención de las componentes principales	
7.2.4.3	Selección del número de componentes principales	
7.2.4.4	Resultados del análisis de componentes principales	
7.3	ASOCIACIONES GEOQUÍMICAS	97
7.4	PATRONES DE DISPERSIÓN GEOQUÍMICA	100
7.4.1	Patrones de dispersión geoquímica secundaria	
7.4.2	Distribución Geoquímica	
7.5	ANOMALÍAS GEOQUÍMICAS	107

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla Nº 1	Principales Características Físicas y Químicas de los Elementos Lantánidos Estudiados.
Tabla Nº 2	Movilidades de Elementos Químicos en Ambientes Supérgenos.
Tabla Nº 3	Producción y Reservas de Tierras Raras a Nivel Mundial.
Tabla Nº 4	Exportación e Importación de los Principales Compuestos de Tierras Raras en EE.UU.
Tabla Nº 5	Precios de los Óxidos de las Tierras Raras en el año 2005.
Tabla Nº 6	Límites de detección para muestras de sedimento.
Tabla Nº 7	Parámetros de Precisión en muestras de Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento La).
Tabla Nº 8	Parámetros de Exactitud en Muestras "Estándares" para Sedimentos de Quebrada de la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Cu).
Tabla Nº 9	Contenido de Metales Traza en Muestras "Blanco" para Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque.
Tabla Nº 10	Poblaciones Estadísticas.
Tabla Nº 11	Estadísticos Descriptivos – La.
Tabla Nº 12	Estadísticos Descriptivos – Ce.
Tabla Nº 13	Estadísticos Descriptivos – Tb.
Tabla Nº 14	Estadísticos Descriptivos – Yb.
Tabla Nº 15	Estadísticos Descriptivos – Lu.
Tabla Nº 16	Estadísticos Descriptivos – Sc.
Tabla Nº 17	Estadísticos Descriptivos – Y.
Tabla Nº 18	Parámetros Estadísticos-Geoquímicos.
Tabla Nº 19	Índices de Correlación de Pearson.
Tabla Nº 20	Matriz de Correlación Muestral.
Tabla Nº 21	Matriz de Correlación Poblacional.
Tabla Nº 22	KMO y prueba de Barlett
Tabla Nº 23	Comunalidades
Tabla Nº 24	Varianza Total Explicada
Tabla Nº 25	Matriz de Componentes
Tabla Nº 26	Matriz de Componentes Rotados
Tabla Nº 27	Matriz de Componentes Rotados (segundo procesamiento)
Tabla Nº 28	Anomalías Geoquímicas-Elementos Lantánidos

RELACIÓN DE MAPAS

Mapa N° 1	Unidades Litológico-Estratigráficas.
Mapa N° 2	Ubicación de Muestras de Sedimentos.
Mapa N° 3	Anomalías Geoquímicas.

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura N° 1	Ubicación del Área de Estudio.
Figura N° 2	Estratigrafía de la zona de estudio.
Figura N° 3	Provincias Tectónicas.
Figura N° 4	Eventos Tectónicas.
Figura N° 5	Principales Estructuras Geológicas.
Figura N° 6	Coeficientes de reparto cristal/líquido de las “tierras raras” en alguno de los minerales ígneos más comunes.
Figura N° 7	Principales Usos de las Tierras Raras en EE.UU. durante el año 2005.
Figura N° 8	Principales fuentes de importación hacia EE.UU. de Tierras Raras.
Figura N° 9	Variabilidad de la precisión en muestras duplicadas-Elemento La.
Figura N° 10	Patrones de exactitud en muestras estándares-Elemento Cu.
Figura N° 11a	Box plot (La).
Figura N° 11b	Histograma de frecuencias (La).
Figura N° 11c	Q-Q Normal (La).
Figura N° 12a	Box plot (Ce).
Figura N° 12b	Histograma de frecuencias (Ce).
Figura N° 12c	Q-Q Normal (Ce).
Figura N° 13a	Box plot (Tb).
Figura N° 13b	Histograma de frecuencias (Tb).
Figura N° 13c	Q-Q Normal (Tb).
Figura N° 14a	Box plot (Yb).
Figura N° 14b	Histograma de frecuencias (Yb).
Figura N° 14c	Q-Q Normal (Yb).
Figura N° 15a	Box plot (Lu).
Figura N° 15b	Histograma de frecuencias (Lu).
Figura N° 15c	Q-Q Normal (Lu).
Figura N° 16a	Box plot (Sc).
Figura N° 16b	Histograma de frecuencias (Sc).
Figura N° 16c	Q-Q Normal (Sc).

Figura Nº 17a	Box plot (Y).
Figura Nº 17b	Histograma de frecuencias (Y).
Figura Nº 17c	Q-Q Normal (Y).
Figura Nº 18	Gráfico de Sedimentación
Figura Nº 19	Asociaciones Geoquímicas PC1-PC2
Figura Nº 20	Asociaciones Geoquímicas PC2-PC3
Figura Nº 21	Asociaciones Geoquímicas PC1-PC3
Figura Nº 22	Asociaciones Geoquímicas PC1-PC2-PC3
Figura Nº 23	Sectores: La Zanja Este y La Zanja Oeste, (Patrones de dispersión).
Figura Nº 24	Variabilidad La-Ce-Rb-Cu, sector La Zanja Este
Figura Nº 25	Variabilidad Yb-Hf-Lu-Tb, sector La Zanja Este
Figura Nº 26	Variabilidad Sc-Y-Co-Ga-Zr-Al, sector La Zanja Este
Figura Nº 27	Variabilidad V, sector La Zanja Este
Figura Nº 28	Variabilidad La-Ce-Rb-Y-As, sector La Zanja Oeste
Figura Nº 29	Variabilidad Tb-Yb, sector La Zanja Oeste

RELACIÓN DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía Nº 1	Zona idónea para extraer una muestra de sedimento.
Fotografía Nº 2	Recolección de sedimentos en varios lugares alrededor del punto de muestreo.
Fotografía Nº 3	Toma de sedimentos de quebrada en campo.
Fotografía Nº 4	Sedimentos de quebrada húmedos.
Fotografía Nº 5	Laboratorio analítico por ICP-MS.
Fotografía Nº 6	Laboratorio analítico de AAS.
Fotografía Nº 7	Muestras para el control de calidad.

RELACIÓN DE ANEXOS

ANEXO 1 Resultados del Aseguramiento y Control de la Calidad

Tabla A1.1	Parámetros de Precisión en muestras de Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Ce).
Figura A1.1	Variabilidad de la precisión en muestras duplicadas-Elemento Ce.
Tabla A1.2	Parámetros de Precisión en muestras de Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Tb).
Figura A1.2	Variabilidad de la precisión en muestras duplicadas-Elemento Tb.
Tabla A1.3	Parámetros de Precisión en muestras de Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Yb).
Figura A1.3	Variabilidad de la precisión en muestras duplicadas-Elemento Yb.
Tabla A1.4	Parámetros de Precisión en muestras de Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Lu).
Figura A1.4	Variabilidad de la precisión en muestras duplicadas-Elemento Lu.
Tabla A1.5	Parámetros de Precisión en muestras de Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Sc).
Figura A1.5	Variabilidad de la precisión en muestras duplicadas-Elemento Sc.
Tabla A1.6	Parámetros de Precisión en muestras de Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Y).
Figura A1.6	Variabilidad de la precisión en muestras duplicadas-Elemento Y.
Tabla A1.7	Parámetros de Exactitud en Muestras "Estándares" para Sedimentos de Quebrada de la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Pb).
Figura A1.7	Patrones de exactitud en muestras estándares-Elemento Pb.
Tabla A1.8	Parámetros de Exactitud en Muestras "Estándares" para Sedimentos de Quebrada de la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Zn).
Figura A1.8	Patrones de exactitud en muestras estándares-Elemento Zn.
Tabla A1.9	Parámetros de Exactitud en Muestras "Estándares" para Sedimentos de Quebrada de la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Ni).
Figura A1.9	Patrones de exactitud en muestras estándares-Elemento Ni.
Figura A1.10	Niveles de La en muestras blanco.
Figura A1.11	Niveles de Ce en muestras blanco.
Figura A1.12	Niveles de Sc en muestras blanco.
Figura A1.13	Niveles de Y en muestras blanco.
Figura A1.14	Niveles de Fe en muestras blanco.
Figura A1.15	Niveles de Cu en muestras blanco.
Figura A1.16	Niveles de Bi en muestras blanco.
Figura A1.17	Niveles de Zn en muestras blanco.
Figura A1.18	Niveles de Pb en muestras blanco.

ANEXO 2 Resultados del Aseguramiento y Control de la Calidad

Figura A2.1	Mapa Isovalórico del Hf
Figura A2.2	Mapa Isovalórico del Lu
Figura A2.3	Mapa Isovalórico del Tb
Figura A2.4	Mapa Isovalórico del Y
Figura A2.5	Mapa Isovalórico del Yb
Figura A2.6	Mapa Isovalórico del Zr
Figura A2.7	Mapa Isovalórico del Ce
Figura A2.8	Mapa Isovalórico del Ga
Figura A2.9	Mapa Isovalórico del Al
Figura A2.10	Mapa Isovalórico del Co
Figura A2.11	Mapa Isovalórico del La
Figura A2.12	Mapa Isovalórico del Rb
Figura A2.13	Mapa Isovalórico del Th
Figura A2.14	Mapa Isovalórico del Mn
Figura A2.15	Mapa Isovalórico del Sc
Figura A2.16	Mapa Isovalórico del V

ANEXO 3 Fotografías de Campo

Fotografía A3.1	Valle del río Chancay en las inmediaciones de Catache, vista hacia el sur oeste.
Fotografía A3.2	Morfología suave de las tobas del Volcánico Huambos en el yacimiento La Zanja, vista mirando al norte.
Fotografía A3.3	Drenaje ácido de roca en la quebrada Tantahuatay, afluente del río Chancay-Lambayeque a 6 Km. al SE de Chugur.
Fotografía A3.4	Drenaje ácido de roca en la quebrada Huamboyaco, a 6 Km. al sur de Huambos.
Fotografía A3.5	Valle encañonado del río Cañad, afluente del río Chancay-Lambayeque, a la altura de la quebrada de Succhupampa. Vista al sur este.
Fotografía A3.6	Morfología típica y fuerte oxidación de las tobas del Volcánico Huambos a 12 Km. al oeste del Distrito del mismo nombre.

ANEXO 4 Glosario

RESUMEN

La Cuenca de los ríos Chancay-Lambayeque, se ubica entre los departamentos de Lambayeque y Cajamarca entre los 6° 20' - 6° 56' de latitud sur y 78° 38' - 80° 00' de longitud oeste, perteneciente a la vertiente del Océano Pacífico.

Afloran en el curso medio de la cuenca unidades volcánico sedimentarias de Jurásico inferior, como es el caso de la Fm. La Leche; unidades volcánicas con intercalación de niveles sedimentarios al norte de la localidad de Tres Tomas, correspondiente a los volcánicos Oyotún; unidades marino continentales del Cretáceo inferior y unidades carbonatadas del Cretáceo, en el primer caso corresponden al Grupo Goyllarisquiza y en el segundo caso a las formaciones Inca, Chúlec, Pariatambo, los grupos Pulluicana, Quilquiñan y las formaciones Cajamarca y Celendín, toda esta secuencia cretácica aflora entre las localidades de Chancay Baños, Chugur, en las sub-cuencas del río La Succha y las quebradas Chiriquipe y Montero.

Los afloramientos del Paleógeno están conformados por los volcánicos del Grupo Calipuy y los Neógenos por los volcánicos Huambos. Los volcánicos del Paleógeno y Neógeno afloran en casi toda la cuenca alta y media.

Existen depósitos cuaternarios glacifluviales en las nacientes, fluviales y aluviales en los valles interandinos y depósitos eólicos en la zona del litoral.

Las rocas intrusivas están conformadas por dos grupos principales: el Batolito de la Costa y una franja intrusiva de stocks menores a lo largo de la Cordillera Occidental, de naturaleza ácida a intermedia.

El contexto estructural de la zona de estudio se encuentra principalmente dentro de la provincia tectónica de Santa Cruz y en menor proporción en la provincia tectónica de Cutervo, los principales plegamientos presentan un rumbo ONO-ESE, estructuras posteriores de rumbo NO-SE cortan dichos plegamientos, además de estructuras de rumbo NNE-SSO, como es el anticlinal que se extiende desde Pulán hasta Uctiyacu. Durante el Mioceno se formaron las estructuras radiales correspondientes a la caldera La Zanja, el estratovolcán Hueco Grande al este y estratovolcán San Miguel al sur constituyendo uno de los rasgos morfoestructurales más importantes.

Metalogenéticamente la zona de estudio corresponde a la provincia metalogenética de plata, oro y polimetálicos de la Franja Volcánica Cenozoica de la Cordillera Occidental, destacando los epitermales de Los Pircos, Tantauatay y La Zanja.

El muestreo geoquímico de sedimentos de escorrentía se llevó a cabo durante el año 2005, como parte del programa de prospección geoquímica regional desarrollado por INGEMMET, en la cual el autor de la presente tesis formó parte de las brigadas de campo. La densidad de muestreo es del orden de 1 muestra/10 Km², recolectándose

un total de 283 muestras de sedimentos activos de quebrada en toda la cuenca, de los cuales se trabajaron con 95 muestras, aquellas donde predominan los sedimentos cuya fuente primaria correspondió a los volcánicos Huambos, debido a la buena distribución espacial de sus afloramientos en la zona de estudio.

Se siguió el protocolo de muestreo geoquímico regional empleado por INGEMMET, donde las muestras fueron tamizadas en el campo empleando el tamiz N° 30 hasta obtener alrededor de 4.5 kg de sedimento fino, en quebradas de primer, segundo, tercer o cuarto orden; con o sin presencia de agua. En cada estación de muestreo se ha tomado información referida a la ubicación, características del sedimento, rodados, así como del entorno geológico, entre otros. Con esta información se asignó a cada una de las muestras la respectiva fuente primaria, según la unidad lito-estratigráfica de aporte de los sedimentos predominantes.

El análisis químico empleado fue mediante ICP-MS con un previo ataque químico con agua regia y para el caso del oro a través de AAS con una digestión seca por ensayo al fuego.

Para el aseguramiento y control de la calidad se emplearon un total de 41 muestras de control (14 estándares, 14 blancos y 13 duplicados).

Estadísticamente los elementos lantánidos presentaron una distribución correspondiente a un comportamiento normal con una asimetría que va de -0.5 a 0.65. Con ayuda de la estadística univariar, bivariar y multivariar, se caracterizó la dispersión geoquímica secundaria de los elementos lantánidos en sedimentos activos de corriente, se identificaron zonas anómalas y las asociaciones geoquímicas más importantes con respecto a los principales elementos traza, además de los elementos pathfinder en base a los patrones de dispersión geoquímica secundaria obtenidos.

Entre las principales conclusiones podemos mencionar que las distribuciones geoquímicas de los elementos lantánidos estudiados son similares excepto el Sc, el que muestra un comportamiento diferente. Las principales asociaciones geoquímicas determinadas en base a la dispersión geoquímica secundaria en sedimentos activos para este tipo de ambiente son: Y-Yb-Tb-Lu-U-Ce-Be-Th-La-Rb; Pb-As-Sb-Tl-Ag-Bi-Zn-Mo-In-Cd. Los elementos pathfinder determinados fueron: Rb para el caso del La y Ce, Hf para el caso de Yb, Lu y Tb.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.1 Marco Teórico

El desarrollo industrial y post-industrial durante la primera mitad del siglo XX ha estado asociado a la explotación y utilización masiva de los metales (Pb, Hg, Zn, Cd, Cu, Cr, Ni). El consumo de los mismos ha aumentado en tres veces aproximadamente durante este periodo. En este mismo contexto a fines del siglo XX, la utilización de nuevas tecnologías: láser, máseres, materiales magneto-ópticos, sistemas de comunicación, ha incrementado la demanda de nuevos metales. Este es caso de los lantánidos, cuya utilización se ha incrementado en cinco veces en las últimas décadas, esto sumado a la necesidad de obtener conocimientos verificados sobre el comportamiento natural de dichos elementos, hace importante tener un mejor entendimiento sobre la dispersión y distribución geoquímica de los elementos lantánidos y la posible relación existente con otros elementos traza ya estudiados anteriormente con mayor amplitud.

1.1.2 Planteamiento del problema

De todo lo expuesto en el marco teórico y siendo conciente de:

- La creciente importancia y utilidad que vienen adquiriendo los elementos lantánidos en la actualidad.
- Que una de las metodologías más útiles empleadas en la caracterización del comportamiento geoquímico de los elementos, específicamente la dispersión secundaria, es la prospección geoquímica de sedimentos activos de corriente.
- Un adecuado análisis estadístico multivariado de los datos experimentales nos conducirá respuestas y conclusiones fehacientes.

Se hace necesario verificar, aportar y difundir nuevos conocimientos acerca del comportamiento geoquímico de dichos elementos en la naturaleza, específicamente referido a la dispersión geoquímica secundaria a escala regional, es por ello que la

presente investigación busca sistematizar respuestas ante el surgimiento las siguientes interrogantes: ¿Los elementos lantánidos presentan los mismos patrones de dispersión geoquímica secundaria?, ¿Las distribuciones geoquímicas secundarias y las concentraciones anómalas de los lantánidos en sedimentos activos de corriente guardan relación directa con la de otros elementos traza?, ¿Es útil el empleo de métodos de análisis estadístico multivariado en la determinación de asociaciones geoquímicas en sedimentos activos de corriente?.

1.1.3 Objetivos

Los objetivos son:

- Caracterizar la dispersión y distribución geoquímica secundaria de los principales elementos pertenecientes al grupo de los lantánidos (“tierras raras”), a partir de sedimentos activos de corriente, cuya fuente primaria de aporte fueron los volcánicos Huambos.
- Determinar las asociaciones geoquímicas entre los elementos lantánidos y los principales elementos traza en sedimentos activos de corriente.
- Determinar si las anomalías geoquímicas de los elementos lantánidos se encuentran relacionadas con otras anomalías de elementos traza.
- Comprobar la utilidad de los métodos de análisis estadístico multivariado en la determinación de asociaciones geoquímicas en sedimentos activos de corriente.

1.1.4 Hipótesis de la investigación

- H1. Los elementos lantánidos podrían presentar patrones de dispersión geoquímica secundaria similares.
- H2. Las distribuciones geoquímicas y concentraciones anómalas de los elementos lantánidos guardarían relación directa o inversa con algunos de los siguientes elementos: Rb, K, U, Th, Ba, Ta, Nb, Ti, Zr, Hf o P.
- H3. El análisis estadístico multivariado, específicamente el método de componentes principales, constituiría una metodología útil para determinar asociaciones geoquímicas en sedimentos activos de corriente.

1.1.5 Justificación de la investigación

La caracterización de la dispersión y distribución geoquímica secundaria de los elementos lantánidos en sedimentos activos de corriente, sería un soporte para resolver las interrogantes planteadas anteriormente, como son: la determinación de los patrones de dispersión, anomalías y las principales asociaciones geoquímicas existentes entre los elementos lantánidos y otros elementos traza, además de poder proponer y comprobar una metodología adecuada en la determinación de asociaciones geoquímicas mediante el uso del análisis de componentes principales, además de poder inferir desde superficie lo que actualmente no se encuentra aflorando.

Todo esto contribuye con nuevos conocimientos acerca del comportamiento geoquímico secundario de los elementos lantánidos presentes en sedimentos activos de quebrada, cuya unidad de aporte perteneció a un ambiente primario correspondiente a un vulcanismo continental del tipo fisural (volcánicos Huambos).

Los aportes que se determinen podrían ser aplicados tanto en la prospección geoquímica de recursos naturales como en geoquímica ambiental.

Los estudios realizados coadyuvan al desarrollo técnico, en estos momentos los elementos lantánidos vienen cobrando mucha importancia y aplicación en la nanotecnología. Genera aportes en el área medioambiental, la información es valiosa si se refiere a líneas de base regional a nivel de cuencas hidrográficas, porque los elementos lantánidos eventualmente pueden acumularse en la biota y en los suelos, teniendo efectos nocivos; de todo lo expuesto anteriormente se puede decir que todos estos conocimientos contribuyen a la sociedad, en la búsqueda de una mejor calidad de vida.

1.2 GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.2.1 Ubicación

La zona de estudio se ubica políticamente en los departamentos de Lambayeque y Cajamarca, geográficamente, se encuentra entre los 6° 20' - 6° 56' de latitud sur, y 78° 38' - 80° 00' de longitud oeste, en la ladera occidental de la cordillera de los

andes del norte que forma la divisoria continental, es decir en la Vertiente del Océano Pacífico (Figura 1).

La cuenca Chancay-Lambayeque presenta un área aproximada de 4000 km², limita al norte con la cuenca del río La Leche, por el sur con la cuenca del río Jequetepeque-Zaña, por el este con la cuenca del Chotano y por el oeste con el Océano Pacífico.

1.2.2 Clima

En la parte baja de la cuenca, el clima es árido, influenciado por las aguas marinas frías pertenecientes a la corriente de Humboldt la que actúa como elemento regulador de los fenómenos meteorológicos.

La temperatura media anual es de 22° C fluctuando entre los 25° C y 18° C; el régimen mensual varía desde valores altos en el verano (25.8° C), bajos en los meses invernales (15° C) y moderadamente altos en los meses primaverales (18.9° C); las temperaturas extremas alcanzan a 35° C la máxima y la mínima a 10.5° C.

Los vientos del Sur y Sur-Este que son predominantes y de moderada intensidad, motivan que la humedad relativa sea relativamente alta, alcanzando un promedio anual de 72%, fluctuando entre el 58% y 93%. Las precipitaciones son mínimas y alcanzan un valor anual de 50 mm, éstas se presentan en forma de chubascos en el verano. Los fenómenos de “El Niño” originan incrementos en la temperatura y en la precipitación pluvial. En algunos años causa serios daños a la agricultura y a la población.

En la parte alta de la cuenca, sobre los 2 000 msnm, el clima es templado; la temperatura alcanza una media anual de 17° C, la máxima 22° C y la mínima 16.6° C.

1.2.3 Fisiografía

Se distinguen seis unidades principales que por su disposición y características muestran un carácter diferencial sobre los suelos que contienen.

a) Valle Encañado: Abarca cerca de 53 000 Ha; se inicia desde la unión del río Chancay con el Maichil, en las faldas del cerro Baicon (400 msnm), dirigiéndose hacia el SO hasta las faldas de los cerros Puntilla, Desaguadero y Campana (150 msnm).

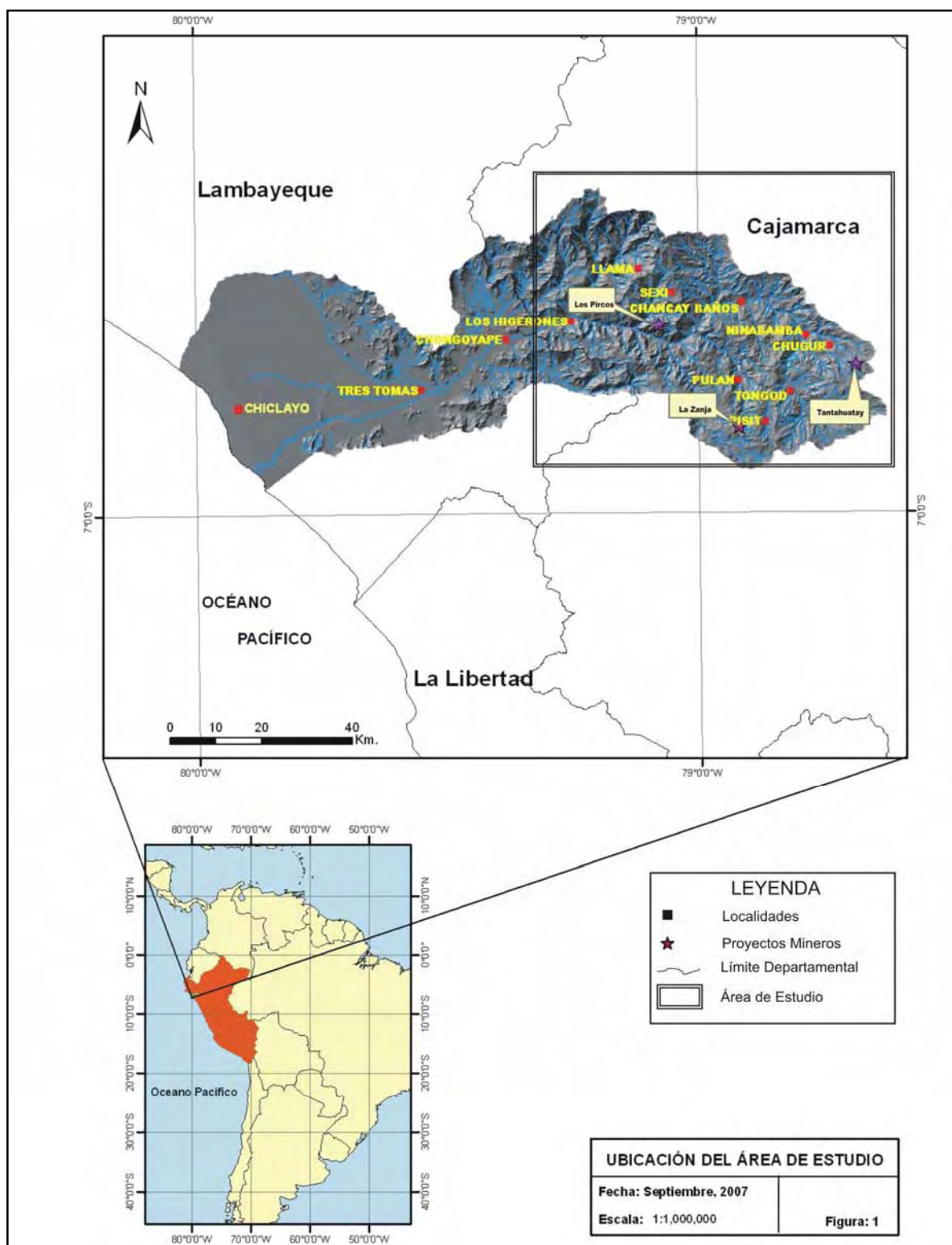


Figura 1 Ubicación del área de estudio

En el sector se encuentra el Reservorio Tinajones, el río desciende suavemente formando un estrecho valle, limitado por cerros altos, pedregosos y desnudos. El valle está formado por tres niveles de terrazas bajas discontinuas, parcialmente erosionadas en algunos sectores y cortadas en otros por cambios en el curso del río y que forman ligeros meandros. Las terrazas tienen una pendiente entre 0 % a 5%; la agricultura es intensiva y variada, la caña de azúcar y el arroz son los cultivos mayoritarios. Las playas formadas por el río son estrechas y están constituidas por depósitos de arena, limo y cantos rodados, sustentado una vegetación ribereña escasa y mayormente herbácea.

b) Llanura aluvial: Comprende unas 147,000 Ha, se inicia en el río Chancay en la falda de los cerros La Puntilla. Está formada por depósitos de materiales transportados por el Canal Lambayeque y el río Reque, en la parte Sur y los ríos La Leche, Mórrope, Motupe y sus afluentes por el Norte. En este espacio se encuentran diseminadas y aisladas pequeñas lomas y colinas; la parte más ancha tiene 45 km de longitud; los terrenos son planos y con escasa gradiente.

En esta unidad fisiográfica se encuentran: terrazas bajas que son amplias, con una pendiente de 2% y 5%, terrazas medias y altas hacia el Este; en la zona de Pucalá, en el cauce del río, ocurren terrazas pantanosas en una área reducida y el río que desemboca al mar, forman en su bocana (Etén) una zona inundada.

c) Abanicos Aluviales Locales: Es una franja discontinua de más de 16,200 Ha, se encuentra limitando la llanura aluvial hacia el Este. Estos abanicos formados por numerosas quebradas no tienen importancia, pues solo la Playa Querque (300 Ha) sostiene una pequeña agricultura temporal.

d) Formaciones Eólicas: Ocupa más de 9,500 Ha, se encuentra en forma dispersa en diversos sectores del valle. En el sector Lambayeque están agrupados formando una cadena de dunas.

e) Terrenos Litorales: Es una estrecha faja de 3,300 Ha, cerca al mar y está constituida por depósitos marinos.

1.2.4 Hidrografía

El río Chancay-Lambayeque pertenece a la vertiente del Pacífico, el cual presenta un régimen irregular, su longitud es de 170 km y en su recorrido recibe aportes eventuales principalmente de los Ríos Cañad, San Lorenzo, Cirato y Cumbil.

La naciente del río Chancay-Lambayeque se encuentra en la laguna de Mishacocha con el nombre de quebrada Mishacocha (cerros Coymolache y los Callejones) a una altitud aproximada de 3,800 msnm, su cauce discurre de este a oeste; posteriormente adopta sucesivamente los nombres de Chicos y Llantén, conociéndose como el de río Chancay - Lambayeque desde su confluencia con el río San Juan hasta el repartidor La Puntilla, a partir de este punto, el río se divide en tres cursos: canal Taymi (al norte), río Reque (al sur) y entre ambos el río Lambayeque; solamente el río Reque desemboca en el Océano Pacífico al norte del Puerto de Eten, mientras que los otros dos ramales el río Lambayeque y el canal Taymi no llegan al mar, debido a que sus aguas son utilizadas para el riego, hasta su agotamiento.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1 ESTRATIGRAFÍA

Las unidades litoestratigráficas que se encuentran en la cuenca Chancay-Lambayeque comprenden un rango que va desde el Triásico hasta el Neógeno, además de depósitos cuaternarios.

La descripción de la litología, espesor, relaciones estratigráficas y edad de cada una de estas unidades se detallan a continuación (Ver Mapa 1 y figura 2).

2.1.1 Triásico superior- Cretáceo superior

2.1.1.1 Formación La Leche

Esta unidad presenta calizas grises moderadamente silicificadas bien estratificadas intercaladas con niveles de lutita, tobas de color violáceo y derrames dacíticos y andesíticos, usualmente puede ser confundida con la Formación Pariatambo.

La Formación La Leche tiene un espesor que varía desde un promedio de 400-500 m, pudiendo superar los 1 000 m (Wilson, 1984).

Esta formación es bastante fosilífera y contiene una fauna diversa, Wilson J. (1984) reporta entre otros fósiles: Espículas de esponja, corales dendroides indeterminables, *Isastraea?* sp., *Pentacrinus* sp., los que probablemente pertenecen al Noriano. Los fósiles más jóvenes reportados en la zona de estudio indican el tope del Jurásico inferior, pero es probable que las calizas hayan alcanzado pisos más jóvenes del Jurásico inferior.

La base de esta secuencia no ha sido observada en el área de estudio. La Formación La Leche infrayace a los Volcánicos Oyotún, intercalándose con esta unidad, esto es observable en la hacienda Cuculí Viejo, en la carretera que une Chongoyape y Chiclayo.

2.1.1.2 Volcánico Oytún

Consiste de bancos piroclásticos y lavas andesíticas y dacíticas, las rocas más comunes son brechas andesíticas masivas de color negro azulado y dacitas porfíricas ya sea como lava o como roca piroclástica con fenocristales de plagioclasa y cuarzo en una matriz fina gris verdosa.

Presenta intercalaciones sedimentarias de tobas, grauvacas y areniscas feldespáticas en la zona de Chongoyape, se ven escasos niveles de calizas laminadas con silicificación moderada (Wilson, 1984).

El espesor de esta unidad en la localidad típica es de 500 m de espesor aproximadamente, en Chongoyape y Chiclayo se estima un espesor de 400 m

El Volcánico Oytún suprayacen a la Formación La Leche e infrayacen en discordancia ligeramente angular a la Formación Tinajones como se evidencia en el sector noroeste del cuadrángulo de Chongoyape.

Se tienen fósiles del Liásico inferior en la zona de Pátapo, en intercalaciones calcáreas a pocos metros de la base de los volcánicos, no pudiéndose precisar la edad del techo, pero relaciones estratigráficas sugieren que la edad sería el tope del Liásico, faltando aún pruebas concluyentes (Wilson, 1984).

2.1.1.3 Formación Tinajones

Consiste de tobas, lutitas de color marrón verdoso, grauvacas de color marrón o gris, cuarcita blanca o marrón rojiza muy compacta y conglomerados de guijarros volcánicos en una matriz arenosa. Además se observan sills dacíticos entre Batán Grande y Chongoyape (Wilson, 1984).

El espesor de esta Formación en el sector norte del cuadrángulo de Chongoyape alcanza aproximadamente 1000 m adelgazándose hacia el sur.

La Formación Tinajones suprayace en discordancia ligeramente angular sobre la Formación Oytún, pasando gradualmente hacia las cuarcitas del Grupo Goyllarisquizga.

La Formación Tinajones contiene fósiles de invertebrados así como de plantas. Se tienen reportes de *Trigonia Lorenti* DANA, del Valanginiano inferior en el cuadrángulo de Incahuasi, además de *Berriasellidae?* del Titoniano y Berriasiano en el área de Yaypón (cuadrángulo de Chongoyape). Restos de Otozamites del Neocomiano son muy comunes (Wilson, 1984).

La base de esta Formación se ubica en el Berriasiano, pudiendo llegar hasta el Titoniano, el límite superior se ubica en el Neocomiano. La Formación Tinajones se correlaciona con las Formaciones Chimú, Santa y Carhuaz.

2.1.1.4 Grupo Goyllarisquizga

a) Formación Chimú

La Formación Chimú no aflora en la zona de estudio, teniendo afloramientos al sur del cuadrángulo de Celendín en el límite con el cuadrángulo de San Marcos (Wilson, 1984).

b) Formación Santa

Al igual que la Formación Chimú, la Formación Santa aflora sólo en el límite de los cuadrángulos de Celendín y San Marcos (Wilson, 1984).

c) Formación Carhuaz

Presenta afloramientos en los sectores central y sur del cuadrángulo de Chota de lutitas, areniscas y cuarcitas marrones y grisáceas bien estratificadas, la Formación Carhuaz presenta un espesor de 200 m

En cuanto a las relaciones estratigráficas, la Formación Carhuaz suprayace a las Formaciones Santa y Chimú en el área de Cajamarca, desapareciendo estas últimas hacia el norte; el tope de la Formación Carhuaz es concordante con las areniscas y cuarcitas de la Formación Farrat. La Formación Carhuaz representa un depósito con predominio continental acumulado durante el Neocomiano y Aptiano (Wilson, 1984).

d) Formación Farrat

Presenta afloramientos en el sector sur del cuadrángulo de Chota, la unidad está constituida de cuarcitas y areniscas blancas de grano grueso a medio con estratificación cruzada. La Formación Farrat yace concordantemente sobre la Formación Carhuaz, al tope se tiene a la Formación Inca en discordancia paralela. En base a las edades de las formaciones que la limitan, se determina que la Formación Farrat pertenece al Aptiano. (Wilson, 1984).

2.1.1.5 Formación Inca

La base de esta unidad presenta algunos metros de caliza arenosa masiva con abundantes restos de *Exogyra* limonitizada, seguida por areniscas de grano medio a grueso con cemento limonítico y lutitas arenosas ferruginosas bien estratificadas con intercalaciones de caliza.

En el cuadrángulo de Chongoyape el espesor de la Formación no supera los 25 m y en los cuadrángulos de Incahuasi, Cutervo y Chota el espesor varía entre 60 y 80 m.

Yace en discordancia sobre los niveles clásticos del Grupo Goyllarisquizga. El contacto superior es concordante y nítido, debido a la ausencia de niveles arenosos ferruginosos donde se advierte un predominio de sedimentos pelíticos y calcáneos de colores grises y amarillos (Wilson, 1984).

En el cuadrángulo de Chota se tienen afloramientos con amonites del género *Parahoplites*, según esto Benavides, V. (1956) le asignó una edad perteneciente al Albiano inferior.

2.1.1.6 Formación Chúlec

La Formación Chúlec consiste de capas delgadas bien estratificadas de lutitas grises, margas amarillas y calizas margosas marrones, las que generalmente se presentan en capas delgadas y nodulares. En el cuadrángulo de Chota la Formación Chúlec alcanza un espesor promedio de 250 m, además en los cuadrángulos de Chongoyape y Chiclayo la Formación Chúlec no sobrepasa los 50 m de lutitas con escasas capas calcáneas.

Presenta contactos concordantes tanto en la base como en el tope con las Formaciones Inca y Pariatambo respectivamente. El contacto en la base está definido por el paso de niveles pelíticos a niveles arenosos y ferruginosos de la Formación Inca. El contacto superior queda marcado por la aparición de las calizas en forma de lajas de la Formación Pariatambo (Wilson, 1984).

En las facies más gruesas de la Formación Chúlec en el cuadrángulo de Chota, se tiene una fauna compuesta por amonites, erizos y lamelibranquios; los amonites reportados son *Knemiceras* y *Parengonoceras* que según Benavides, V. (1956) indican la parte inferior del Albiano medio. Las facies más finas contienen escasos amonites y abundantes restos de *Trigonia*, *Exogyra*, *Neithea* y *Echinoidea*.

2.1.1.7 Formación Pariatambo

Presenta un mejor desarrollo en el cuadrángulo de Chota, alcanzando un espesor de 150-250 m de calizas con intercalaciones de lutitas en niveles delgados, ambas presentan amonites y escamas de peces. Las calizas son de grano fino de color negro, bituminosa y frecuentemente con un olor fétido, con estratificación delgada, formando lajas características; los niveles lutáceos son negros y bituminosos.

Hacia el oeste de Chota la Formación Pariatambo se vuelve tobácea, entre Cumbil y Llama las calizas presentan intercalaciones de lutitas grises y tobas violáceas. Los niveles tobáceos predominan en el sector occidental del cuadrángulo de Chongoyape, aflorando en Huaca Blanca al sur de la localidad de Chongoyape, alcanzando espesores de 200-300 m de tobas bien estratificadas con intercalaciones de caliza gris.

Suprayace concordantemente a las margas, lutitas y calizas de la Formación Chúlec, el contacto superior con el Grupo Pulluicana es concordante, evidenciado por el paso hacia arriba de calizas oscuras y tobas a bancos de caliza gris oscura de mayor espesor.

Todas las facies contienen *Oxitropidoceras carbonarium*, que indica la parte superior del Albiano medio (Wilson, 1984).

2.1.1.8 Grupo Pulluicana

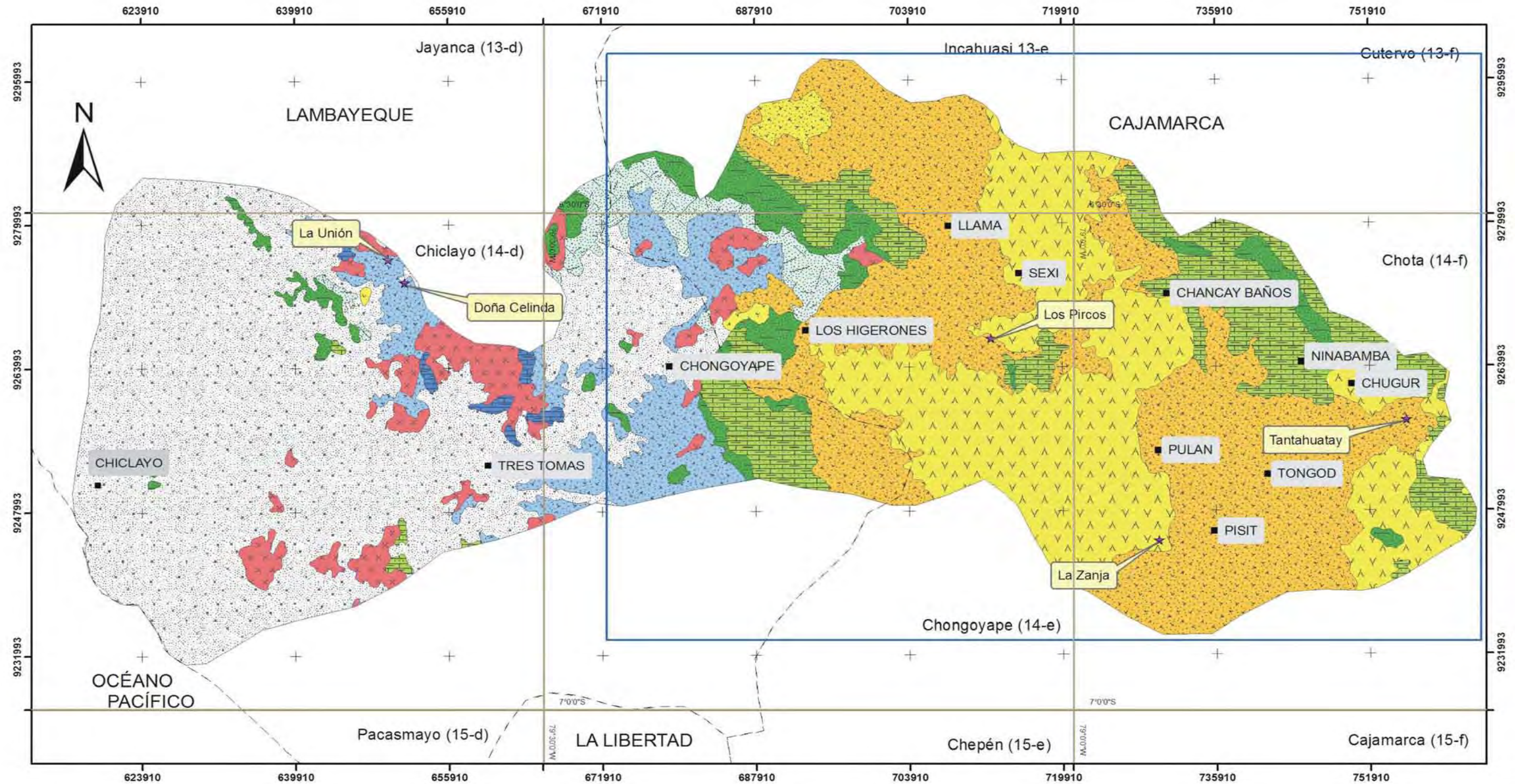
Presenta su mejor desarrollo en el cuadrángulo de Chota, compuesta de caliza arcillosa de color gris, irregularmente estratificada con intercalaciones de niveles margosos de color marrón y lutitas grisáceas a verdosas, además de algunas capas de limonitas y areniscas. En este sector el Grupo Pulluicana alcanza un espesor de 800 a 1100 m

En el cuadrángulo de Chongoyape el Grupo Pulluicana está constituido por calizas y lutitas negras, teniendo un espesor promedio de 200 m reduciéndose a 25 m en el cerro Las Minas en la margen izquierda del río Chancay, al sureste de la localidad de Chongoyape.

El contacto inferior del Grupo Pulluicana con la Formación Pariatambo es concordante en el cuadrángulo de Chota pero más al este el contacto se manifiesta en discordancia paralela. El Grupo Pulluicana infrayace concordantemente con las

ERA	PERIODO	ÉPOCA	UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	DESCRIPCIÓN LITOLOGICA	ESPESOR (m)	ROCAS INTRUSIVAS
CENOZOICO	CUATENARIO	HOLOCENO	Dep. Eólicos	Localizados en la llanura costera, formando mantos irregulares de arena y dunas que son transportadas por los vientos.		<div>Granodiorita</div> <div>Tonalita</div> <div>Monzonita</div> <div>Diorita</div> <div> <div>gd</div> <div>to</div> <div>mz</div> <div>di</div> </div>
			Dep. Fluviales	Constituido por bloques, cantos y gravas subredondeadas a redondeadas, heterogéneas con matriz generalmente areno-limosa.		
			Dep. Aluviales	Constituido por bloques, cantos y gravas angulares a subangulares, heterogéneas con matriz areno-limosa.		
			Dep. Fluvioglaciares	Constituidos por cantos y gravas angulosos a subangulosos, relacionados a depósitos morrénicos.		
	NEÓGENO	MIOCENO	Volc. Huambos	Tobas y brechas ácidas con fragmentos de cuarzo, biotita en una matriz feldespática y fragmentos de pómez fibrosos de color blanco. Existen niveles de tobas andesíticas y escasos niveles de ignimbritas.		
	PALEÓGENO		Gpo. Calipuy	Volcánico Llama		
MESOZOICO	CRETACEO	SUPERIOR	Fm. Celendin	Calizas arcillosas, nodulares de color crema oscuro a marrón, con intercalaciones de lutitas y margas de color gris con tonos azulados, predominando estas últimas sobre las calizas.		100
			Fm. Cajamarca	Calizas finas bien estratificadas de color marrón claro, con presencia de amonites, gasterópodos y foraminíferos.		
			Grupo Quilquiñán	Lutitas margosas con intercalaciones calcáreas compuestas por sedimentos blandos de color marrón oscuro.		
		INFERIOR	Grupo Pulluicana	Caliza arcillosa de color gris, irregularmente estratificada, con intercalaciones de niveles margosos de color marrón y lutitas grisáceas a verdosas, además de algunas capas de limonitas y areniscas.		
			Fm. Pariatambo	Calizas de grano fino de color negro bituminosa con intercalaciones de niveles delgados de lutitas, con presencia de amonites y escamas de peces.		
			Fm. Chulec	Capas delgadas bien estratificadas de lutitas grises, margas amarillas y calizas margosas marrones, las que generalmente se presentan en capas delgadas y nodulares.		
			Fm. Inca	Caliza arenosa masiva, seguida por areniscas de grano medio a grueso con cemento limonítico y lutitas arenosas ferruginosas bien estratificadas con intercalaciones de caliza.		
			Grupo Goyllarisquiza	Fm. Farrat, cuarcitas y areniscas blancas de grano medio a grueso con estratificación cruzada.		
			Fm. Tinajones	Fm. Carhuaz, lutitas, areniscas y cuarcitas marrones y grisáceas bien estratificadas.		
				Compuesta de tobas, lutitas de color marrón verdoso.		
				Grauvacas, cuarcitas blancas o marrones rojizas muy compactas y conglomerados de guijarros volcánicos en una matriz arenosa. Además se observan sills decíticos entre Batán grande y Chongoyape.		
	JURÁSICO	SUPERIOR	Volcánico Oytún	Piroclastos, lavas andesíticas y dacítica, las más comunes son brechas andesíticas masivas. Presenta intercalaciones de tobas, grauvacas y areniscas feldespáticas.		500
		INFERIOR				
	TRIÁSICO	SUPERIOR	Fm. La Leche	Calizas grises moderadamente silicificadas, bien estratificadas, con intercalaciones de lutitas, tobas de color violáceo y derrames dacíticos y andesíticos.		400-500

Figura 2 Estratigrafía de la zona de estudio



lutitas y margas del Grupo Quillquiñan, siendo el contacto muy nítido por el contraste existente entre dichas facies (Wilson, 1984).

Los fósiles reportados en el Grupo Pulluicana son: *Exogyra*, *Inoceramus*, siendo escasos los amonites. Benavides, V. (1956) dató este grupo en el intervalo que va desde la etapa tardía del Albiano medio y el Cenomaniano temprano en base al hallazgo en las capas basales de *Oxitropidoceras carbonarium* (GABB) y *Acanthoceras* en la parte superior del grupo.

El Grupo Pulluicana se correlaciona con la parte inferior de la Formación Jumasha en los Andes Centrales y con la parte inferior de la Formación Copa Sombrero (Wilson, 1984).

2.1.1.9 Grupo Quillquiñan

El Grupo Quillquiñan está compuesto de lutitas friables de color gris oscuro y capas delgadas de margas azuladas. En el sector de Chongoyape el espesor promedio es de 120 m y en el cuadrángulo de Chota alcanza los 150-200 m

Se pueden observar niveles de 15-20 cm de espesor de margas porosas y ferruginosas con abundantes moldes de lamelibranquios. Las calizas que se intercalan con las lutitas y margas son escasas.

El Grupo Quillquiñan suprayace al Grupo Pulluicana de manera concordante e infrayace concordantemente a la Formación Cajamarca (Wilson, 1984).

Esta unidad fue datada en el intervalo Cenomaniano tardío a Turoniano temprano por su contenido de amonites (Benavides, 1956).

2.1.1.10 Formación Cajamarca

La Formación Cajamarca tiene su mejor desarrollo al noreste del cuadrángulo de Chota, donde alcanza espesores de 500 m en promedio llegando a 700 m en algunas zonas. En el área de estudio aflora en el cerro Las Minas (al sureste de la localidad de Chongoyape), donde alcanza un espesor de 150 m

Esta unidad está compuesta de calizas finas bien estratificadas de color marrón claro, con presencia de fauna como amonites, gasterópodos y foraminíferos.

La Formación Cajamarca tanto al tope como a la base está limitada de manera concordante por la Formación Celendín y el Grupo Quillquiñan respectivamente (Wilson, 1984).

Por el contenido de *Coilopoceras newelli*, se le asigna a esta Formación una edad Turoniana tardía (Benavides, 1956). Se le correlaciona con la parte superior de la Formación Jumasha y con la Formación Copa Sombrero al noroeste del país.

2.1.1.11 Formación Celendín

La Formación Celendín aflora en el cuadrángulo de Chota al norte y noreste de la localidad de Chancay Baños, está constituida de delgadas capas de caliza nodular arcillosa de color crema oscuro a marrón, con intercalaciones de lutitas y margas de color gris con tonos azulados, predominando éstas últimas sobre las calizas.

El espesor de esta unidad es variable, en la localidad de Bambamarca alcanza hasta 300 m, mientras que en el área de estudio sólo unas decenas de metros.

La Formación Celendín suprayace concordantemente a la Formación Cajamarca. El contacto superior es una discordancia paralela donde yacen los conglomerados y areniscas de la Formación Chota (Wilson, 1984).

La fauna presente la constituyen amonites, lamelibranquios, gasterópodos y equinoideos, según los amonites encontrados por Benavides (1956) se afirma que esta unidad pertenece al Coniaciano y Santoniano temprano

2.1.1.12 Formación Chota

Esta unidad aflora en la parte central y oriental del cuadrángulo de Chota, no habiéndose observado en el área de estudio.

2.1.2 Paleógeno – Neógeno

2.1.2.1 Grupo Calipuy

a) Volcánico Llama

El Volcánico Llama se encuentra ampliamente distribuido en la cuenca Chancay-Lambayeque, teniendo afloramientos en las localidades de Chancay Baños, Platanar y La Esperanza pertenecientes al cuadrángulo de Chota; al suroeste del cuadrángulo de Cutervo (al sur de la localidad de Huambos); al norte y noreste de la localidad de Chongoyape.

La base está compuesta de conglomerados rojizos con intercalaciones de tobas violáceas a moradas, los clastos del conglomerado basal son guijarros bien

redondeados de cuarcita y en menor proporción de composición calcárea y volcánica. El espesor es variable, así por ejemplo en la localidad de Cochabamba presenta un espesor de 1-5 m, en la localidad de Llama y Catache alcanza un espesor de 50 m y en la localidad del mismo nombre alcanza hasta 1200 metros.

Se infiere que el espesor fue mucho mayor que el máximo observable, ya que existió un periodo de fuerte erosión antes del vulcanismo Porculla.

Sobre la base conglomerádica existe una secuencia de lavas y material piroclástico, la litología más común es una brecha andesítica masiva de color violáceo a morado; lavas andesíticas de textura porfirítica de color gris verdoso y violáceo y niveles de tobas andesíticas. Aunque la predominancia litológica está representada por las andesitas, existen proporciones significativas de dacitas y riódacitas.

El Volcánico Llama yace en discordancia paralela al este de la zona de estudio (Bambamarca) sobre la Formación Chota, variando a una discordancia levemente angular en el sector de Yauyucán y Querocoto sobre las calizas del Grupo Pulluicana. El tope del Volcánico Llama infrayace discordantemente al Volcánico Porculla del Paleógeno (Wilson, 1984).

La edad de estos volcánicos se infiere a partir de sus relaciones estratigráficas, al yacer en discordancia paralela sobre la Formación Chota, se le asigna una edad Paleógena (Wilson, 1984).

b) Volcánico Porculla

Esta unidad no aflora en la zona de trabajo.

2.1.2.2 Volcánico Huambos

Esta unidad volcánica aflora en el sector sur oeste del cuadrángulo de Cutervo en la localidad de Huambos, al oeste del cuadrángulo de Chota y en el sector oriental del cuadrángulo de Chongoyape.

Están constituidos por tobas y brechas ácidas con fragmentos de cuarzo de hasta 3mm de diámetro, cristales euhedrales de biotita en una matriz feldespática y fragmentos de pómez fibrosos de color blanco.

Existen niveles de tobas andesíticas que se distinguen por su coloración rojiza a morada, en contraste con los niveles piroclásticos ácidos que presentan colores gris verdosos, rosados o amarillos; además se observan escasos niveles de ignimbritas.

El espesor del Volcánico Huambos es irregular debido a la erosión posterior, pero en promedio alcanza entre 50 y 100 m con un máximo aproximado de 400 m en la localidad de Huambos y en los alrededores de la hacienda Udimá (cuadrángulo de Chongoyape).

Se le asigna al Volcánico Huambos una edad correspondiente al Plioceno medio o tardío, debido a que los Andes habían ascendido por lo menos 1000 m y además se produjo la erosión de las superficies 2000 m, 2900 m y 3600 m, encontrándose las tobas cubriendo estas superficies (Wilson, 1984).

Se le correlaciona con la Formación Yungay (Wilson et al, 1964), también con las tobas que conforman el bosque de piedras en la parte central del Perú y con el Volcánico Sencca al sur del Perú. (Wilson, 1984).

2.1.2.3 Depósitos Cuaternarios Recientes

En la zona de estudio tenemos una diversidad de depósitos cuaternarios. En la zona costera y de estribaciones andinas existen abundantes depósitos de naturaleza aluvial y fluvial, constituidos por conglomerados, gravas, arenas y limos; sobre estos depósitos se tienen depósitos eólicos, los que forman playas a lo largo del litoral.

En la Cordillera Occidental y la región interandina los depósitos fluviales y aluviales se encuentran restringidos a pisos de valles, desembocaduras de las quebradas, terrazas y zonas planas. (Wilson, 1984).

2.2 ROCAS INTRUSIVAS

En la zona de estudio las rocas intrusivas están representadas por dos grupos principales: el Batolito de la Costa y una franja intrusiva de stocks menores a lo largo de la Cordillera Occidental.

2.2.1 Batolito de la Costa

El Batolito de la Costa se encuentra emplazado en estratos relativamente deformados del Mesozoico y Paleógeno, en esta región consiste de grandes cuerpos de tonalita y

granodiorita acompañados de cuerpos menores de diorita, sienita, monzonita y pequeños intrusivos ácidos de edad posterior (Wilson J., 1984).

Se han notado las siguientes fases de intrusivos:

a) Diorita.- Se tienen afloramientos algo restringidos de diorita, los que son cortados por los demás componentes del batolito, esta fase de dioritas parece indicar la primera etapa de intrusión; es posible que las monzonitas que en realidad son dioritas hayan sufrido un metasomatismo producto de las intrusiones posteriores.

Estos intrusivos afloran en el curso superior de la quebrada de los Desaguaderos (al norte del cerro de la Puntilla), en el cerro Saltur (al sur de la localidad del mismo nombre) donde también se presentan monzonitas y sienitas, ésta última intruye a las dos primeras, las relaciones entre ellas hacen pensar que posiblemente pertenecen a una misma unidad; todo esto ubicado en el cuadrángulo de Chiclayo; también se presentan afloramientos de diorita al norte de la localidad de Chongoyape (Wilson, 1984).

b) Monzonita.- Esta fase intrusiva presenta un desarrollo restringido en la zona de estudio, aflorando con mejor notoriedad al este de la localidad de Reque en el Cerro Negro, Cerro Guitarra, Cerro San Juanito y el Cerro de Reque.

c) Granodiorita y Tonalita.- La mayor parte del Batolito de la Costa está constituido por grandes cuerpos de granodiorita y tonalita, estos plutones son extensos y muestran contactos verticales con la roca encajonante, sin producir un efecto considerable sobre éstas ya sea del tipo metasomático o estructural.

En el cuadrángulo de Chiclayo, entre los cerros Pan de Azúcar y Chumillán, la tonalita debido a su ascenso genera una gran cúpula sin cortar la roca de caja, la Formación La Leche (Wilson, 1984).

d) Sienita.- Se presentan importantes cuerpos de sienita los cuales cortan a las unidades antes mencionadas, siendo parte de los últimos grandes intrusivos de este complejo batolítico.

Esta unidad presenta sus mejores afloramientos en el cuadrángulo de Chiclayo en el cerro de Reque, Colorado, Negro, Cabeza de Mono, Saltur y Ventarrón, en éste

último se observan facies xenolíticas las cuales sugieren que el mecanismo de “stoping” fue importante en el emplazamiento de los intrusivos (Wilson, 1984).

2.2.2 Franja Intrusiva de la Cordillera Occidental

En la Cordillera Occidental se encuentran aflorando una serie de stocks alineados los cuales conforman una franja, los que son generalmente de composición dacítica, asociados en gran parte a la mineralización polimetálica de la serranía. Los intrusivos subvolcánicos de esta franja están relacionados con las unidades volcánicas del Paleógeno-Neógeno.

a) Intrusivos menores

Constituidos por stocks, sills pórfido cuarcíferos y andesíticos, en la mayoría de los casos las edades de estos intrusivos no se han comprobado siendo probable que representen una misma fase de intrusión. Los sills pórfido cuarcíferos y aplíticos se encuentran cerca a los contactos de granodiorita, en otros casos, según las relaciones de campo entre los intrusivos mayores y menores se logró determinar que éstos últimos son más jóvenes.

CAPÍTULO III

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El contexto estructural de la zona de estudio se encuentra principalmente dentro de la provincia tectónica de Santa Cruz y en menor proporción en la provincia tectónica de Cutervo; la provincia tectónica de Santa Cruz presenta estructuras aisladas que corresponden a las distintas fases de la orogénesis andina, en buena parte estuvo tectónicamente neutral durante dichos movimientos, de tal forma que ahora se caracteriza por pliegues pequeños o relativamente suaves, con áreas extensas e estratos sub-horizontales (ver figura 3).

Las estructuras presentes parecen haberse producido junto con el plegamiento principal de la Provincia Tectónica Chimú. Los mejores ejemplos son los pliegues pequeños ubicados entre Chongoyape y el límite meridional del cuadrángulo del mismo nombre que se han desarrollado a lo largo de rumbos ONO-ESE. Así como ocurre con la Provincia Tectónica Chimú, este plegamiento ocurrió antes de la deposición del Volcánico Llama.

Estructuras posteriores de rumbo NO-SE cruzan y cortan a los pliegues mencionados. La relación es clara en el caso de las estructuras cerca a Chongoyape, donde el sinclinal original ha sido plegado y fallado.

El rumbo NO-SE es bastante común a través de toda la provincia tectónica de Santa Cruz, pero la mayoría de las estructuras son pequeñas en relación a la tectónica general de las provincias adyacentes. Tal es el caso de las fallas que se juxtaponen al Cretáceo inferior y al Volcánico Oytún al SO de Chongoyape y las fallas que cortan al Cretáceo cerca de Catache.

No se puede precisar si las estructuras NO-SE provienen del levantamiento de la Provincia Tectónica de Pacasmayo, al oeste o se relacionan al desarrollo de la Provincia Tectónica de Cutervo al este. Sin embargo se plantea que dichas estructuras son más jóvenes que el Volcánico Llama y por lo tanto se relacionan con la Provincia Tectónica de Cutervo, ya que el levantamiento principal de la Provincia Tectónica de Pacasmayo ocurrió antes de que se depositen el Volcánico Llama.

En algunos sectores de la zona estudiada se encuentran estructuras de rumbo NNE-SSO, el mejor ejemplo es el anticlinal que se extiende desde Pulán hasta Uctiyacu. Además existen extensas áreas donde hubo poca deformación, aparte de pequeños

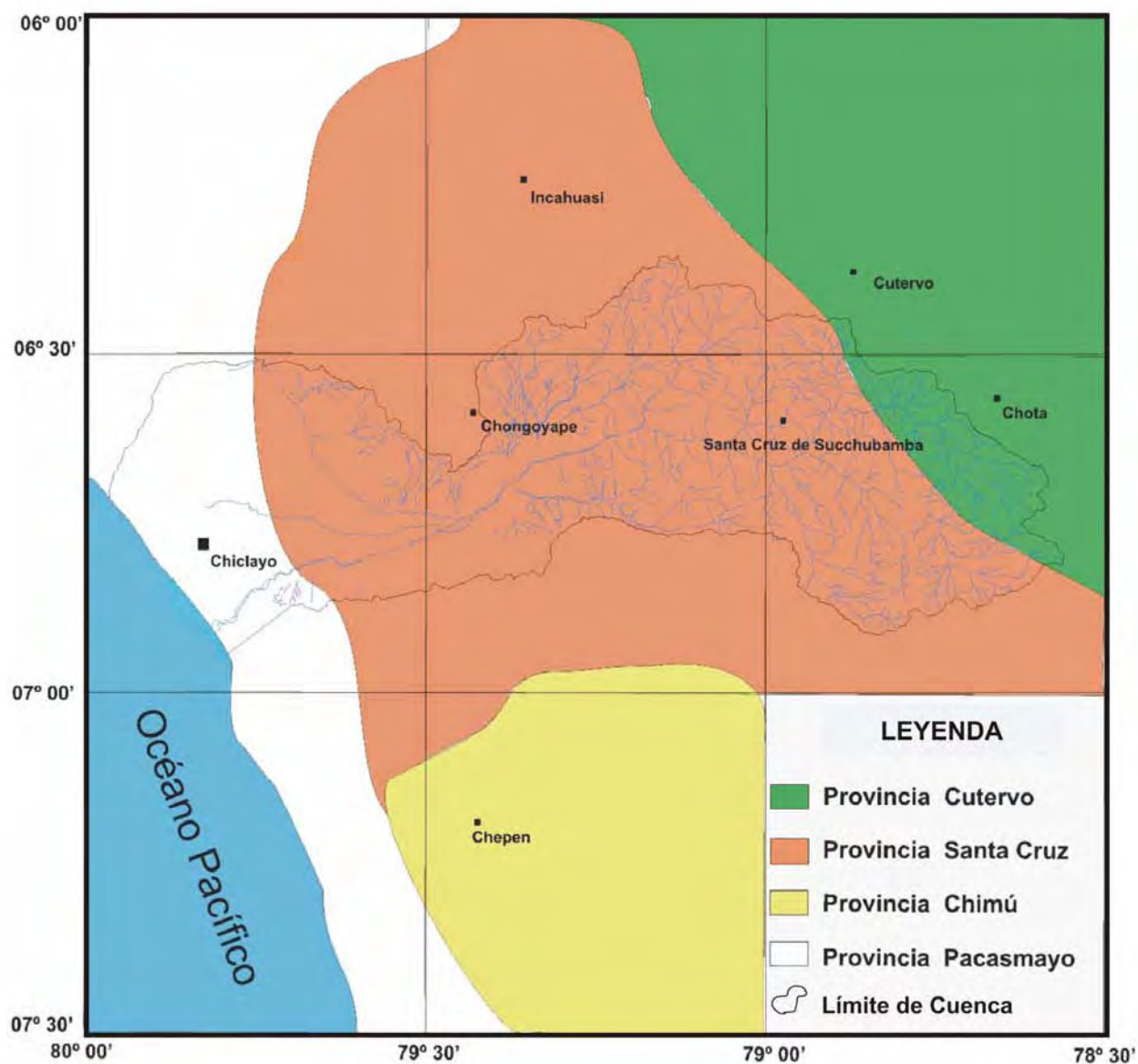


Figura 3 Provincias Tectónicas, tomado de Wilson (1984).

movimientos verticales, como es el caso del área comprendida entre Chugur y Santa Cruz, donde el Cretáceo superior está separado del Volcánico Llama, solamente por una pequeña discordancia, manteniéndose ambas unidades sub-horizontales, es evidente que no hubo una deformación importante a nivel regional ni antes ni después del vulcanismo del Paleógeno-Neógeno.

Se interpreta a la Provincia Tectónica de Santa Cruz como un área neutral que quedó al margen de las deformaciones importantes que afectaron a los sectores adyacentes. Dichas deformaciones dejaron efectos sobre la Provincia Tectónica de Santa Cruz pero a escala relativamente reducida (Wilson, 1984).

3.1 DESARROLLO ESTRUCTURAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

Los episodios estructurales de la cuenca Chancay-Lambayeque pueden ser resumidos a partir de los movimientos del Jurásico medio a tardío, los que generaron estructuras de rumbo aproximado NE-SO; es posible que las estructuras antiguas controlaron en cierta forma los movimientos posteriores, pero no se puede demostrar esta relación hasta encontrar casos específicos de estructuras antiguas reactivadas posteriormente.

Los movimientos nevadianos a finales del Jurásico medio y comienzos del superior, provocan una emersión del territorio peruano, generando una discordancia que se ubica entre el Titoniano y el Bajociano correspondiendo ello a una importante epirogenésis. Este levantamiento determina en el Centro y Norte la definitiva separación en dos cuencas: una Noroccidental y la otra Oriental, teniendo al centro un bloque levantado que se conoce como Arco del Marañón.

Los mares se retiraron definitivamente de la región andina a fines del Cretáceo, produciéndose regresiones paulatinas y luego el levantamiento de la secuencia sedimentaria durante la primera fase orogénica Andina (fase Peruana de Steinmann). Se producen luego amplios plegamientos en el sector Occidental, así como fallamientos, delineándose entonces la Cordillera Occidental, (INGEMMET, 1995). Esta primera fase de deformación andina corresponde al plegamiento principal de la Provincia Tectónica Chimú que muestra un rumbo ONO-ESE, cambiando en el área de Cajamarca a un rumbo NO-SE, dicho plegamiento fue anterior a la deposición del Volcánico Llama y probablemente antes de la deposición de la Formación Chota, (Wilson, 1984).

Con respecto a la orogénesis andina de fines del Cretáceo e inicios del Paleógeno se pueden reconocer dos hechos significantes:

- Varias fases de deformación de distintas edades y características estructurales, éstas fases ocurrieron separadas geográficamente, aunque en algunas áreas se sobre impusieron.
- Los rumbos diferentes de las estructuras andinas corresponden a direcciones tectónicas antiguas de manera que se sospecha que existió una conexión entre estructuras de edades diferentes (Wilson, 1984).

Conjuntamente con esta fase tectónica se tuvo el emplazamiento de grandes porciones del Batolito de la Costa, en forma de pulsaciones que continúan hasta el Paleógeno, decreciendo en el Neógeno.

La segunda fase orogénica denominada por Steinmann con el nombre de “Fase Inca”, empezó en el Eoceno tal vez de medio a temprano; donde ocurren perturbaciones locales que culminan a fines del Eoceno con una fuerte deformación por compresión, evidenciadas por plegamientos que afectan a las capas rojas finicretácicas, así como por un fallamiento inverso, siendo la región más afectada la zona norte y central de la Cordillera Occidental, esto originó un imbricamiento a lo largo de fallas inversas de alto ángulo (INGEMMET, 1995). En esta fase orogénica ocurre el levantamiento de la Provincia Tectónica de Pacasmayo, donde las estructuras producidas por esta fase tienen un rumbo NO-SE (Wilson, 1984), ver figura 5.

La “Fase Inca” fue la más importante del Ciclo Andino, tanto por su extensión como por sus efectos; habiendo continuado luego una actividad erosiva intensa y luego un vulcanismo activo durante el Oligoceno, correspondiente al vulcanismo Llama (INGEMMET, 1995).

La tercera fase de orogenia Andina ocurre durante el Mioceno medio, puesto que las series volcánico-sedimentarias del Oligoceno llegan hasta el Mioceno inferior (cubriendo a las estructuras fini-eocénicas) casi sin discordancias mayores; sin embargo entre el Mioceno inferior y superior si las hay, de allí entonces que se puede ubicar la siguiente deformación importante después de la fase incaica en los tiempos del Mioceno medio.

Para Steinmann, hubo sólo una tercera fase a la que llamó “Fase Quechua” y la ubicó en el Mioceno tardío; sin embargo las dataciones de los Volcánicos Huaylillas en el Sur, Caudalosa en el centro, con edades entre 10 a 14 Ma. los mismos que se encuentran plegados sobre los Grupos Tacaza y Castrovirreyna, cuyas edades están entre 17 y 30 Ma. denotan una deformación entre los 17 y 14 Ma., es decir en el Mioceno medio (INGEMMET,1995).

La tercera fase de deformación (“Fase Quechua”) corresponde a la Provincia Tectónica de Cutervo, la que consistió en la formación de pliegues y fallas de rumbo NO-SE con estructuras menores de rumbo NE-SO; dicho plegamiento es posterior al Volcánico Llama, pero anterior al Volcánico Porculla, habiéndose producido durante el Paleógeno. Después de depositarse el Volcánico Porculla se dieron movimientos menores, produciéndose fallas y flexuras, pero de poca importancia con respecto a las fases de deformación anterior (Wilson, 1984).

La fase “Quechua ” es compresiva, aunque sus esfuerzos son menores que los de la “Fase Incaica”, con pliegues más abiertos y fallamiento reactivados. Luego de ella, se produce una acción erosiva fuerte que genera la “Superficie Puna” extendida a toda la Cordillera Occidental y que es sepultada por los Volcánicos Huambos (INGEMMET,1995).

El emplazamiento del Batolito de La Costa se habría producido durante un periodo de tiempo bastante amplio y resulta difícil determinar dicho periodo con respecto a las fases de deformación, pero se reconoce que los cuerpos plutónicos principales se emplazaron después del vulcanismo Llama, el problema principal radica en determinar si la intrusión principal ocurrió antes o después de la tercera fase de deformación o sea aquella que produjo el plegamiento de la Provincia Tectónica de Cutervo.

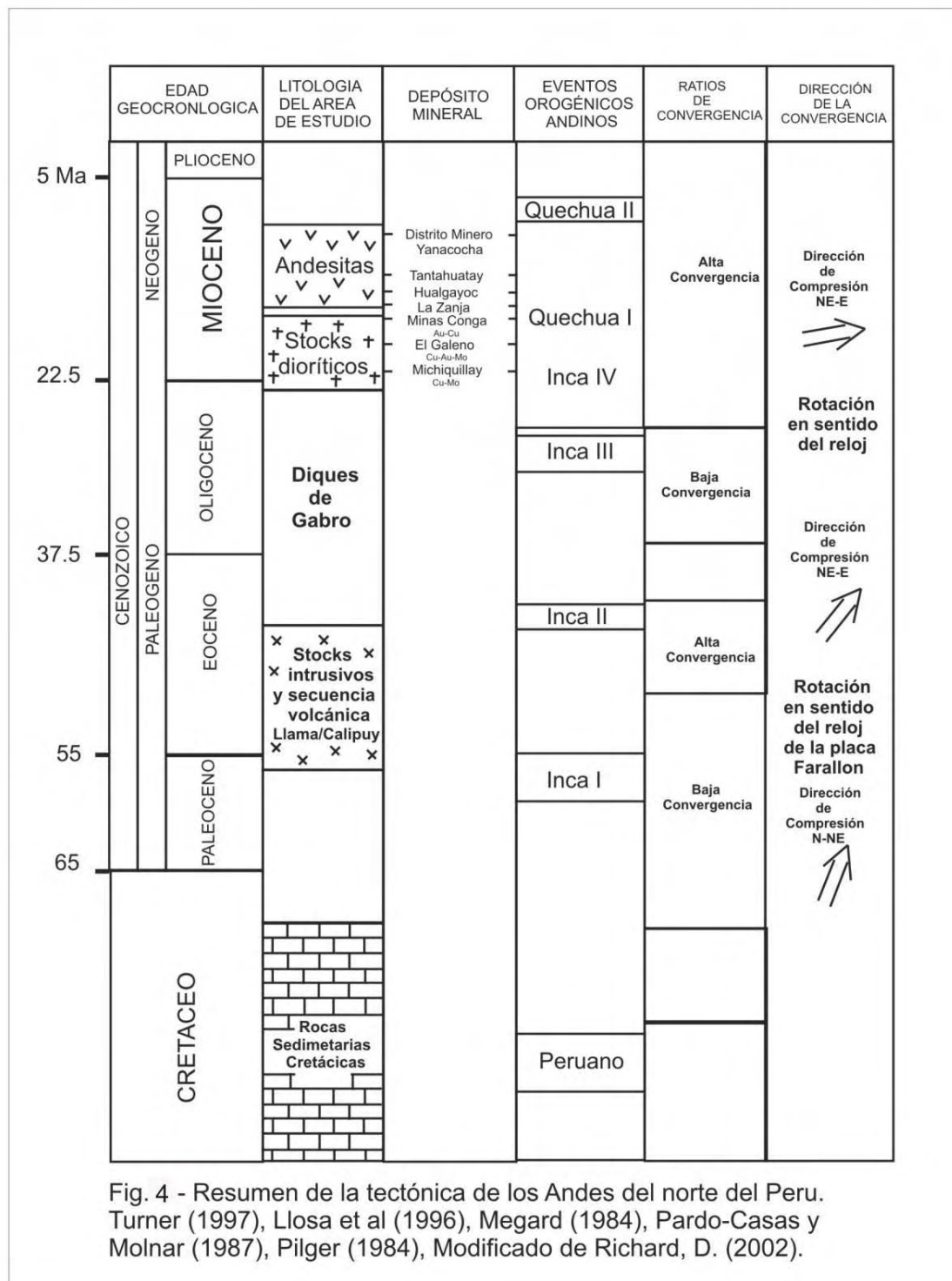
Las relaciones estructurales al este de Tembladera, sugieren que el bloque hundido del Volcánico Llama fue metamorfizado en su posición actual considerando que la falla que produjo el hundimiento pertenece a la tercera fase de deformación. Es de suponer que el emplazamiento del Batolito se prolongó hasta después de dichos movimientos, esta hipótesis esta apoyada en el hecho de que algunos plutones pertenecientes al Batolito de la costa cortan al Volcánico Porculla (Wilson, 1984).

El último evento tectónico que afectó a la región fue el levantamiento general de los andes, llegando a altitudes que sobrepasan los 3000 msnm, durante el Neógeno (Plioceno) y Cuaternario. En la zona de estudio se han reconocido rasgos topográficos escalonados que probablemente resultaron del levantamiento de los Andes por etapas o saltos abruptos, separados por fases de estabilidad que fueron suficientemente largos como para permitir el desarrollo de superficies relativamente maduras de erosión (Wilson, 1984).

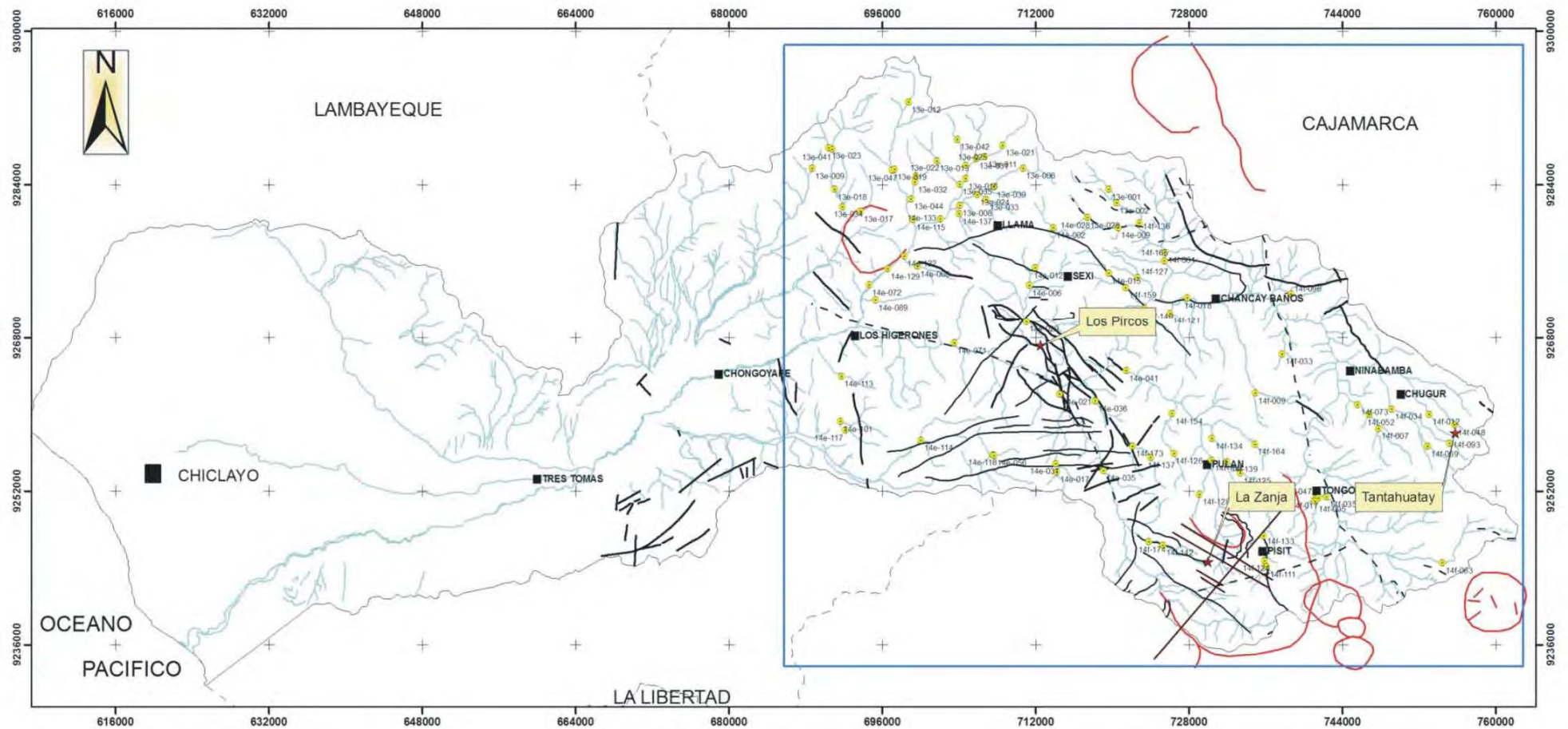
El levantamiento y las deformaciones varían en el tiempo y en las diferentes latitudes, intercalándose períodos de quietud que tienen una mayor duración donde se formaban las superficies de erosión, siendo una de las más importantes la Superficie Puna que como se dijo antes, se formó aproximadamente en el Mioceno medio (14 Ma.) y con una extensión regional.

La superficie Puna, formada inicialmente aproximadamente a 1000 msnm, con el levantamiento pliocénico fue llevada hasta los 4000 msnm. Estos movimientos estarían vinculados a una tercera Fase Quechua, ubicada entre 6 y 7 Ma. (INGEMMET, 1995).

Gustafson, et al (2004) resume los eventos tectónicos de la zona de estudio según la secuencia tectónica mostrada en la figura 4.



DISPERSIÓN GEOQUÍMICA SECUNDARIA DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS LANTÁNIDOS EN LA CUENCA DE LOS RIOS CHANCAY-LAMBAYEQUE



LEYENDA

- Muestra de Sedimento
- Drenaje
- Limite de Cuenca
- Limite Departamental
- Area de Estudio
- Principales Localidades
- ★ Proyectos y Prospectos
- Lineamientos Fotointerpretados
- Fallas Reconocidas
- Estructuras circulares

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



DIRECCIÓN DE RECURSOS MINERALES Y ENERGÉTICOS

ESTRUCTURAS GEOLOGICAS

PROYECCIÓN: WGS 1984, UTM ZONA 17 SUR

ESCALA: 1: 400,000

BACH : LUIS ENRIQUE VARGAS RODRIGUEZ

Figura N°5

CAPÍTULO IV

ASPECTOS METALOGENÉTICOS

La zona estudiada según Bellido y Montreuil (1972), corresponde a la Provincia Metalogenética de Ag, Au y polimetálicos de la franja Volcánica Cenozoica de la Cordillera Occidental, la que a continuación se describe.

4.1 PROVINCIA METALOGENÉTICA DE AG, AU Y POLIMETÁLICOS DE LA FRANJA VOLCÁNICA CENOZOICA DE LA CORDILLERA OCCIDENTAL

Las rocas volcánicas del Cenozoico se encuentran distribuidas en el norte y centro del Perú, aflorando principalmente al oeste de la divisoria de la Cordillera Occidental; en la región meridional la franja volcánica se extiende a ambos lados de la divisoria de dicha cordillera con una ancho mayor de 150 km a 200 km (Tumialán, 2003). En el sector norte de la Cordillera Occidental, cerca de Cajamarca y Huaraz, existen algunos depósitos diseminados de Au-Ag, siendo los más importantes los de Yanacocha, Sipán, Pierina y Tantahuatay (Vidal & Cabos, 1983; Candiotti & Guerrero, 1997; Klein et al., 1997; Noble et al., 1997). Las edades de éstos depósitos oscilan entre 15.7 a 14.5 Ma. (Mioceno medio) y se encuentran relacionados con estrato-volcanes desarrollados a lo largo de fallas con rumbo suroeste-noreste. Los conos volcánicos están conformados por rocas piroclásticas, domos y diques de composición andesítica a dacítica. La mineralización con leyes de 1 a 3 g/Ton de Au se encuentran en rocas piroclásticas que fueron afectadas por una intensa alteración hidrotermal. Los mayores valores de Au se encuentran asociados a zonas de sílice residual (vuggy sílica), las que se encuentran rodeadas por alteración argílica avanzada, constituida por cuarzo-alunita y acompañada con una disminución gradual de valores de Au. Finalmente, la argilitización avanzada gradúa hacia la periferia a una alteración argílica estéril conformada principalmente por caolinita (Steinmuller, 1999). Según Klein et al. (1997) y Noble et al. (1997), los depósitos se formaron por fluidos ácidos de alta sulfuración que provocaron primero la alteración argílica avanzada con cuarzo-alunita pirita, la formación de “vuggy sílica” y la deposición de minerales de alta sulfuración (enargita, azufre nativo, baritina). Luego, el

Au y la Ag fueron introducidos en un estado tardío por fluidos de menor sulfuración que destruyeron a la pirita, enargita, azufre y baritina y formaron óxidos e hidróxidos de hierro.

Asimismo la presencia de estos *stocks* ácidos jóvenes que cortan tanto a los sedimentos mesozoicos como a los volcánicos paleógeno-neógenos, han introducido una mineralización de cobre, plomo, zinc y plata, dando lugar a depósitos polimetálicos de vetas y skarn, los cuales son descritos líneas abajo.

- **Sarita Colonia**, yacimiento ubicado en la provincia de Lambayeque, distrito de Salas, es del tipo de relleno de fisura emplazado en granodiorita-tonalita y cuya mineralización se encuentra caracterizada por calcopirita, galena, esfalerita y como ganga presenta pirita, cuarzo y óxidos de hierro (Paz, 1996).
- **Asunción**, se encuentra ubicado en el distrito de Querocoto, provincia de Chota, es un yacimiento del tipo de relleno de fisura y de reemplazamiento en forma de mantos emplazados en calizas, tufos y derrames volcánicos, su mineralización consiste de galena, esfalerita, marmatita, calcopirita, tetraedrita y como minerales de ganga presenta pirita y calcita (Paz, 1996).
- **La Unión**, es un skarn ubicado en el departamento de Lambayeque, provincia de Ferreñafe, está emplazado en horizontes calcáreos pertenecientes al Grupo Zaña del Triásico superior (Noriano-Retiano). La mineralización está constituida por calcopirita, galena, esfalerita, covelita, bornita, malaquita y como minerales de ganga, pirita, granate, cuarzo y calcita.
- **Orolcocha y Doña Celinda**, son dos depósitos ubicados en el departamento de Lambayeque, localidad de Batán Grande, del tipo Skarn, cuya mineralización está constituida por galena, calcopirita, esfalerita y estibina.
- **Los Pircos**, constituye otra de las zonas de interés en esta franja, se ubica en el departamento de Cajamarca en la localidad de Sexi, éste yacimiento es un sistema epitermal de baja sulfuración, caracterizado por la presencia de un sistema de vetas de cuarzo, calcita y baritina. Su mineralización está constituida por pirita fina con inclusiones de oro, galena y esfalerita, oro libre en cuarzo, argentita, sulfosales de plata y hematita. Estas vetas se encuentran alojadas en

el Volcánico Llama del Paleógeno la cual se caracteriza según Wilson (1985), por ser una secuencia de rocas volcánicas continentales de origen lávico y clástico, cuya composición varía de andesitas a riolitas.

Algunos trabajos de interpretación de imágenes satelitales y observaciones de orden regional han permitido identificar estructuras y corredores estructurales alineados en dirección NE-SW, conformadas por fallas y plegamientos, centros de actividad hidrotermal y emplazamiento mineral.

La Zanja, ubicado en el departamento de Cajamarca, distrito de Pulán, provincia de Santa Cruz, es un epitermal de Au-Ag-(Cu) de alta sulfuración. Durante el Mioceno medio se desarrolló un intenso vulcanismo calcoalcalino en los bordes de los arcos magmáticos continentales. La composición de estas emisiones volcánicas es intermedia variando entre dacitas a andesitas. Los sistemas estructurales desarrollados durante la orogenia andina, fueron alineados bajo direcciones preferenciales teniendo en cuenta las direcciones de los elipsoides de esfuerzos, controlaron la ocurrencia de los centros eruptivos locales de tipo fisural que fueron alineados a lo largo de los sistemas compresivos NW-SE. (Valdivia, 2004), ver figura 5.

El prospecto La Zanja está compuesto por 3 centros volcánicos de probable edad Miocénica, estos según su edad relativa de emplazamiento se ordenan: caldera La Zanja al noroeste, estratovolcán Hueco Grande al este y estratovolcán San Miguel al sur.

Estos centros volcánicos sobreyacen a potentes niveles piroclásticos del Volcánico Llama del Paleógeno. Sedimentos clásticos/carbonatados Cretácicos del Grupo Goyllarisquizga fuertemente plegados y fallados infrayacen discordantemente a las secuencias anteriores. Todas estas secuencias fueron intruídas por stocks graníticos-granodioríticos contemporáneos con el Batolito de la Costa. Los sistemas de alteración principales se desarrollaron en los centros volcánicos de La Zanja y Hueco Grande, éste último se encuentra conformado principalmente por flujos piroclásticos gruesos (block & ash flows) e ignimbritas soldadas dacíticas en niveles potentes intercalados con flujos de lavas porfiríticas andesíticas a la base y lavas afaníticas y domos andesíticos-dacíticos al tope. En el sector noroeste se observa un sistema de estructuras radiales angostas (figura

5) con fuerte silicificación acompañada de alteración cuarzo-pirofilita-illita-(alunita) hacia los flancos. Estas estructuras tienen longitudes de cientos de metros y anchos decamétricos como máximo, con anomalías geoquímicas de oro, arsénico y mercurio.

La caldera La Zanja constituye el rasgo morfo-estructural más importante con un diámetro interno de 4 km y externo de más de 12 km cuyo flanco noroeste está abierto (figura 5). Está conformada por ignimbritas soldadas y flujos piroclásticos gruesos dacíticos a la base. Esta secuencia es cortada por domos andesíticos-dacíticos y domos riódacíticos-riolíticos. La caldera es finalmente rellenada por depósitos volcanoclásticos intracaldera y de avalancha, hacia la parte central se ha emplazado un stock tardío de composición diorítica (Tanabe & Turner, 2000).

La mineralización de Au en la Zanja es del tipo ácido-sulfato: Enargita-Baritina. Sulfuros: enargita, pirita, bornita, cinabrio, calcopirita, covelita, galena, esfalerita. Óxidos: limonitas (goethita), hematita. Sulfatos: Baritina. Otros: Azufre nativo y turmalina. Esta ocurre en dos zonas adyacentes, Pampa Verde y San Pedro Sur localizadas sobre el margen sur de la caldera San Pedro. Intensa alteración ácido-sulfato con ensambles de sílice masiva a “vuggy sílica”, sílice-alunita y sílice-arcilla-pirita son generalmente localizados alrededor del interior del anillo de la caldera, considerando que la alta ley de Au está restringida a un corredor estructural ONO que cruza la margen sur de la caldera. Rocas alteradas fuertemente hacia fuera de la zona estructural está generalmente sin mineralización. Los eventos mineralizantes están por consiguiente considerados a ser más jóvenes que la formación de la caldera, post emplazamiento de los flujos de domo a lo largo del anillo de la caldera, pero ampliamente sincrónico con la erupción de los flujos andesíticos tardíos (Turner, 1999).

Según las dataciones realizadas por el método Ar/Ar, a este yacimiento se le asigna una edad de mineralización de 15.61 ± 0.12 millones de años (Noble, 2004).

- **Tantahuatay**, es otro yacimiento del tipo epitermal de Au-Ag de alta sulfuración ubicado en el departamento de Cajamarca distrito de Chugur. Se encuentra alojado en rocas volcánicas del tipo diatremas piroclásticas con domos

subaéreos en ambientes parcialmente lagunares. Inicialmente predominan las emisiones piroclásticas a partir de fisuras, brechas-pipe y/o diatremas. A continuación aparecen los diques y domos andesítico-dacíticos, que configuran lineamientos kilométricos. A finales del ciclo eruptivo aparecen nuevamente chimeneas de brecha en asociación a zonas de intenso fracturamiento con alteración hidrotermal del tipo argílico avanzada y mineralización aurífera de alta sulfuración. La base de la columna estratigráfica está definida por una secuencia silicoclástica perteneciente al Grupo Goyllarisquizga del Cretáceo inferior. Suprayacen otra secuencia de silicoclásticos y carbonatos del Cretáceo superior pertenecientes a las formaciones Inca, Chúlec, Pariatambo y Grupo Pulluicana. Estas secuencias son intruidas por monzonitas porfiríticas, stocks subvolcánicos y *sills* andesíticos del Eoceno.

La mineralización se presenta en cuerpos silíceos (cuarzo) y pirita con enargita-oro los cuales son afectados por diversas etapas de oxidación para formar menas diseminadas de $\text{Au} \pm \text{Ag}$. La introducción posterior de sílice, en asociación con baritina, es acompañada por oro nativo y electrum. Los óxidos de Fe (limonitas, jarosita) se han formado a partir de los sulfuros (pirita, enargita, covelita, tetraedrita y otras sulfosales de Ag, Pb y Cu).

A escala distrital, la mayor parte del fracturamiento se ordena en los sistemas $\text{N}45^\circ$ a 60° E, $\text{N}15^\circ$ a 45° O y en menor grado N-S. Las principales fallas reconocidas son las de más reciente actividad con formación de *horst* y *grabens* con orientación $\text{N}30^\circ$ O. Los efectos gravitacionales de este sistema de fallas exponen niveles contrastados en bloques adyacentes con preservación de rasgos epitermales versus bloques con erosión de los mismos y exposición de yacimientos porfiríticos (Vidal, 2001).

Según Noble y Mckee (1999), este yacimiento presenta una edad de mineralización de 12.4 ± 0.4 Ma.

CAPÍTULO V

ELEMENTOS LANTÁNIDOS

Los lantánidos han sido tradicionalmente conocidos como “tierras raras”. El nombre de «tierras», proviene de que antiguamente se denominaban así a las sustancias sólidas (óxidos) a las que ya no se podía descomponer en otras más simples, esto era porque imperaba entonces la noción griega de los cuatro elementos: tierra, fuego, aire y agua. Por otra parte, se les consideraba «raras» en la época en que se descubrieron, cuando Arrhenius, en 1787 recolectó un mineral desconocido, posteriormente llamado gadolinita. Sucesivos estudios demostraron que las “tierras raras” eran elementos relativamente abundantes en la naturaleza (Rivera, 2007).

Las “tierras raras” o lantánidos son un grupo de 15 elementos, que forman parte del periodo seis de la Tabla Periódica, estos son: lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio, con números atómicos que varían de 57 a 71 respectivamente. El elemento prometio (Pm) no ocurre en la naturaleza debido a su rápida desintegración de sus isótopos, por lo tanto de vida media muy corta.

La abundancia de estos elementos en la corteza terrestre es relativamente alta, incluso abundan en minerales como por ejemplo la monacita, en la cual se encuentran distintos lantánidos e itrio.

Es necesario recalcar que para el presente estudio sólo se consideraron al La, Ce, Tb, Yb, Lu, Sc e Y; los demás elementos no se estudiaron debido a restricciones analíticas.

En el capítulo referido a discusión de resultados, se tuvo a bien presentar el comportamiento de la dispersión geoquímica secundaria del escandio e itrio, si bien es cierto dichos elementos originalmente no fueron considerados como “tierras raras”, no obstante éstos muestran un comportamiento geoquímico afín a la de los lantánidos para el tipo ambiente geológico estudiado (vulcanismo fisural), toda vez de aprovechar al máximo la información de las variables estudiadas y obtener así un mejor panorama en cuanto al comportamiento geoquímico de los elementos en cuestión.

5.1 UBICACIÓN EN EL SISTEMA PERIÓDICO

Los lantánidos pertenecen al grupo de elementos de transición interna, todos a excepción del lantano presentan el orbital 4f parcial o totalmente lleno. Estos elementos son químicamente bastante parecidos entre sí puesto que los electrones situados en orbitales f son poco importantes en los enlaces que se forman, en comparación con los p y d. También son bastante parecidos a los lantánidos el **itrio (Y)** y el **escandio (Sc)**, al igual que los lantánidos, su estado de oxidación más importante es el +3. Éste es el estado de oxidación más importante de los lantánidos, pero también presentan el estado de oxidación +2 y +4.

El radio de los lantánidos va disminuyendo conforme aumenta el número atómico; no son variaciones grandes, pero se van acumulando. Esto provoca que los elementos del bloque d de la segunda y tercera serie de transición presenten radios similares dentro de un grupo, éstos deberían aumentar al bajar en un grupo, pero al haberse intercalado los lantánidos, este aumento en el radio al bajar dentro de un grupo se ve contrarrestado por la disminución del radio por la presencia de los lantánidos. Debido a la cantidad creciente de protones en el núcleo incrementa la atracción sobre las orbitas electrónicas externas, que no varían en número de electrones. A este fenómeno se le conoce como **“contracción de los lantánidos”**.

La “contracción lantánida” es la responsable de la entrada preferencial de los cationes menores (“tierras raras” pesadas) en la posición del calcio y que las “tierras raras” ligeras se concentren en las fracciones tardías.

5.2 INCLUSIÓN DEL ITRIO Y ESCANDIO

Se incluye al itrio como parte del grupo de “las tierra raras”, debido a que está asociado íntimamente en la naturaleza con los lantánidos y presenta muchas similitudes químicas. Actualmente también se incluye en el grupo de las “tierras raras” al escandio, debido a su gran relación química con el itrio; el escandio antes era excluido debido a que su **radio iónico, considerablemente menor, influyen en sus propiedades**. Algunos autores consideran al itrio como parte del grupo de las “tierras raras” sobre todo las de cerio en soluciones acuosas durante la meteorización, (Rankama & Sahama, 1949). El itrio presenta un comportamiento geoquímico similar a la de una tierra rara pesada. Lo hace a temperaturas mayores que el subgrupo del cerio debido a que tiene una

semejanza más grande con el calcio en radio iónico ($\text{Ca} = 0.99 \text{ \AA}$, $\text{Gd} = 1.11 \text{ \AA}$, $\text{Lu} = 0.99 \text{ \AA}$), (Rivera, 2007). Además tanto el escandio y el itrio, poseen potenciales de ionización similares a la de los demás elementos lantánidos que suelen ocupar un lugar en las redes cristalinas de los principales minerales que contienen a dichas “tierras raras”. A su vez presentan propiedades físicas y químicas similares a la de los lantánidos y por eso suelen estar asociados a sus principales ocurrencias mineralógicas.

5.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

Los lantánidos presentan una adición de electrones del tipo f cuando el número de protones aumenta, estos electrones se alojan en una órbita ($4f$) muy interna, permaneciendo las demás órbitas invariables. Los electrones de la órbita $4f$ distinguen un elemento de otro en la serie y al estar en una órbita muy interna ejercen poco efecto sobre las propiedades del grupo, gracias a ello, todos los elementos tienden a presentarse juntos, (Rankama & Sahama, 1949) y (Rivera, 2007). Sin embargo, las diferencias en sus propiedades son suficientemente significativas, como para tener aplicaciones industriales específicas, las que cada vez son mayores.

El escandio y el itrio presentan una relativa semejanza en las estructuras de sus orbitas electrónicas, con respecto a los elementos lantánidos propiamente dichos aunque su radio iónico es sustancialmente menor (Rankama & Sahama, 1949).

El factor que influye principalmente en las propiedades de los lantánidos es **el radio iónico**. En la tabla 1 se muestran las principales propiedades físicas y químicas de los elementos lantánidos estudiados.

5.4 DIVISIÓN DE LOS ELEMENTOS LANTÁNIDOS

El criterio para dividir a las “tierras raras” es el número de electrones presentes en el nivel $4f$, de acuerdo con sus propiedades las “tierras raras” se dividen en tres subgrupos:

- 1.- Subgrupo de los lantánidos o “tierras raras” ligeras (TRL) o del cerio. Está formado por la serie del lantano al samario.
- 2.- Subgrupo de los lantánidos o “tierras raras” intermedias (TRI), conformadas por el europio, gadolinio y terbio.
- 3.- Subgrupo de los lantánidos o “tierras raras” pesadas (TRP) o del itrio. Lo integra la serie del disprosio al Lutecio.

Tabla 1 Principales Características Físicas y Químicas de los Elementos Lantánidos Estudiados

Elemento	Configuración Electrónica	Número Atómico	Abundancia* (ppm)	Radio Iónico (Å)	Electronegatividad	Potencial de Ionización (eV)	Minerales	Formula Química	Aplicaciones
La	[Xe] 5d ¹ 6s ²	57	2.05	1.15	1.10	5.577	Monacita ** Cerita Alanita u Ortita Bastnäsita ** Lantanita	(CePO ₄) (Ce ₃ (La, Dy, Al, Ca, Fe)H(SiO ₄) ₃ .H ₂ O) (Ca,Ce,La,Na) ₂ (Al, Fe,Mg) ₃ [OH(SiO ₄) ₃] ((Ce,La,Dy)[(CO) ₃ F]) [(La,Dy,Ce) ₂ CO ₃ .8H ₂ O]	Aleaciones. Un 25% se usa como aditivo para fuentes luminosas intensas usadas en cinematografía (lámparas de arco de carbono), proyección, iluminación de estudios, etc. (igual que el resto de las "tierras raras"). Lentes de cámaras. Fabricación de crisoles, el La ₂ O ₃ proporciona al vidrio resistencia a los álcalis. Esponjas de Hidrógeno con aleaciones de La.
Ce	[Xe] 4f ² 6s ²	58	2.3	1.01	1.12	5.470	Monacita ** Cerita Alanita u Ortita Bastnäsita ** Samarskita	(CePO ₄) (Ce ₃ (La, Dy, Al, Ca, Fe)H(SiO ₄) ₃ .H ₂ O) (Ca,Ce,La,Na) ₂ (Al, Fe,Mg) ₃ [OH(SiO ₄) ₃] ((Ce,La,Dy)[(CO) ₃ F]) (Y,Er,Ca,Fe,Mn,Sn,W,U,Ce)[(Nb,Ta) ₂ O ₇] ₃)	Mecheros (piedras), balas trazadoras, flash, iluminación en proyectores y cámaras cinematográficas (lámparas de arco de carbono). Aleaciones resistentes al calor. Catalizador en el refinado del petróleo. Aplicaciones metalúrgicas y nucleares. Cristal azul y cristales fluorescentes. Hay que considerar que es el más abundante, así como el más reactivo (excepto el Europio).
Tb	[Xe] 4f ⁹ 6s ²	65	0.58	1	1.20	5.850	Monacita ** Gadolinita Cerita Samarskita Xenotima ** Euxenita **	(CePO ₄) ([Y ₂ FeBe ₂ (SiO ₄) ₂ O ₂]) (Ce ₃ (La, Dy, Al, Ca, Fe)H(SiO ₄) ₃ .H ₂ O) (Y,Er,Ca,Fe,Mn,Sn,W,U,Ce)[(Nb,Ta) ₂ O ₇] ₃) [YPO ₄] [(Ce,Er,U,Th,Ca)(Nb,Ta,Ti,Fe) ₂ O ₆]	Activador para producir color verde en tubos de televisión. Junto con ZrO ₂ puede usarse como estabilizador cristalino de células de combustible que operan a elevada temperatura. El borato de sodio y terbio se ha usado en dispositivos de estado sólido.
Yb	[Xe] 4f ¹⁴ 6s ²	70	1.85	1.13	1.10	6.254	Monacita ** Gadolinita Samarskita Xenotima Euxenita	(CePO ₄) ([Y ₂ FeBe ₂ (SiO ₄) ₂ O ₂]) (Y,Er,Ca,Fe,Mn,Sn,W,U,Ce)[(Nb,Ta) ₂ O ₇] ₃) [YPO ₄] [(Ce,Er,U,Th,Ca)(Nb,Ta,Ti,Fe) ₂ O ₆]	Posiblemente, el iterbio tenga uso en la mejora del grano, fuerza y otras propiedades mecánicas del acero inoxidable. Se ha informado de que un isótopo se ha usado en como fuente de radiación para un equipo portátil de rayos X.
Lu	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ²	71	0.6	0.93	1.27	5.426	Euxenita Blomstrandina Gadolinita Xenotima Monacita **	[(Ce,Er,U,Th,Ca)(Nb,Ta,Ti,Fe) ₂ O ₆] Igual que la Euxenita pero con mayor contenido en Ti ([Y ₂ FeBe ₂ (SiO ₄) ₂ O ₂]) [YPO ₄] (CePO ₄)	Se ha empleado para la fabricación de dentaduras postizas. Los núclidos estables (175-Lu y 176-Lu) que emiten radiación beta después de su activación con neutrones térmicos pueden usarse como catalizadores en craqueo, alquilación hidrogenación y polimerización. El Lutecio sigue siendo el elemento más caro de todas las denominadas "tierras raras".
Y	[Kr] 4d ¹ 5s ²	39	6.13	0.93	1.22	6.380	Monacita Gadolinita Talenita Xenotima Bastnäsita **	(CePO ₄) ([Y ₂ FeBe ₂ (SiO ₄) ₂ O ₂]) (Y ₂ Si ₂ O ₇) [YPO ₄] ((Ce,La,Dy)[(CO) ₃ F])	Y ₂ O y el YVO ₄ activados con Eu forman el componente rojo de los receptores de televisión a color. El óxido de itrio se emplea para producir granates de itrio-hierro (Y ₃ Fe ₅ Si ₃ O ₁₂), muy eficientes como filtros de microondas y también en la transmisión y transducción de energía acústica. En cantidades de 0,1 a 0,2% se usa para reducir el tamaño de grano en el Cr, Mo, Zn y Ti y para incrementar la resistencia de las aleaciones de aluminio y magnesio y otros.
Sc	[Ar] 3d ¹ 4s ²	21	5.8	0.81	1.36	6.540	Cerita Alanita u Ortita Wolframita Euxenita Gadolinita Xenotima Wiikita Davidita ** Thortveitita **	(Ce ₃ (La, Dy, Al, Ca, Fe)H(SiO ₄) ₃ .H ₂ O) (Ca,Ce,La,Na) ₂ (Al, Fe,Mg) ₃ [OH(SiO ₄) ₃] [(Fe,Mn)(WO ₄)] [(Ce,Er,U,Th,Ca)(Nb,Ta,Ti,Fe) ₂ O ₆] ([Y ₂ FeBe ₂ (SiO ₄) ₂ O ₂]) [YPO ₄] [(Ti,Fe)(SiO ₄) con Nb sustituyendo a Ti y Fe por Sc [(Ti,Fe(III),V) ₃ (Fe(II),Ce,U,Ca y otros)(O,OH) ₇] (Sc ₂ Y ₂ Si ₂ O ₇)	El isótopo radiactivo ⁴⁶ -Sc se usa como trazador en el craqueo de petróleo. Entre sus compuestos: El óxido de escandio (Sc ₂ O ₃) se está usando para producir luces de gran intensidad. El yoduro de escandio añadido a lámparas de vapor de mercurio produce una luz muy parecida a la solar, que se usa en grabaciones en el interior de estudios de TV y por la noche

(*)Abundancias en meteoritos silicatados (Nodackk, 1935).

(**) Ocurrencias comerciales.

Estos subgrupos tienden a formar minerales en los que uno predomina sobre el otro, aunque siempre con cierta mezcla entre ambos (Rivera, 2007).

5.5 CARÁCTER GEOQUÍMICO DE LOS ELEMENTOS LANTÁNIDOS

Presentan un carácter litófilo, según la clasificación de Goldschmidt, por lo que comúnmente se presentan formando sales oxigenadas; principalmente flúor carbonatos y fosfatos en asociación con silicatos;

Por su escasez en la naturaleza (<0.1%) se clasifican como «*elementos traza*», unos tienden a incorporarse a minerales tempranos y otros a minerales tardíos, por lo que se subdividen en compatibles e incompatibles, según sea el caso:

- a) Los compatibles se concentran en los sólidos como son el europio y el iterbio, que se alojan, respectivamente, en las plagioclasas sódicas y en los granates. Su coeficiente de reparto es bastante superior a es a uno.
- b) Los incompatibles, que tienden a permanecer en solución en los fluidos magmáticos residuales, entre ellos tenemos a los de incompatibilidad alta que lo constituyen el subgrupo del cerio, siendo principalmente cerio y lantano, acompañados comúnmente por Cs, Rb, K, U, Th, Ba, Ta y Nb, de radio grande y cargas menor o igual 2^+ ; estos elementos pertenecen a los elementos denominados litófilos de gran radio iónico (LILE). Los de incompatibilidad baja forman el subgrupo del ltrio, acompañados por Ti, Zr, Hf y P (elementos de alta valencia “HFSE”) y son elementos de radio pequeño y carga mayor o igual a 3^+ . Su coeficiente de reparto es igual o inferior a uno.

En resumen, la variación gradual de los radios iónicos hace que a medida que aumenta el radio iónico, los elementos sean cada vez más incompatibles, o sea, los coeficientes de reparto sean cada vez menores.

Una variación regular del radio iónico de las “tierras raras” trivalentes es de enorme importancia en su comportamiento geoquímico. Como las “tierras raras” son trivalentes en una mayoría de condiciones geológicas, con la excepción del Eu y Ce que pueden también ocurrir como Eu^{2+} (dependiendo de la fugacidad del oxígeno) y el Ce^{4+} (en condiciones altamente oxidantes).

Los elementos lantánidos representan un claro ejemplo de la regla de Oddo /Harkings, que se enuncia «que los elementos de número atómico par son más abundantes que sus miembros vecinos impares, debido a su mayor estabilidad de sus núcleos atómicos» (Rankama & Sahama, 1949).

Las denominadas “tierras raras” son consideradas como inmóviles durante el metamorfismo y generalmente ellos proporcionan excelente información acerca de los materiales pre-metamórfico. Sin embargo, la removilización de las “tierras raras” ha sido observada en algunos casos, donde hay una proporción elevada fluido/roca, tales como el metasomatismo de alta temperatura, metamorfismo de bajo grado y meteorización. Los elementos lantánidos han sido también usados como monitores de los cambios químicos involucrados en los depósitos minerales hidrotermales (Rivera, 2007).

En ambientes supérgenos los lantánidos se presentan inmóviles tanto en ambientes oxidantes como en reductores, ver tabla 2.

Tabla 2 Movilidades de Elementos Químicos en Ambientes Supérgenos*

Movilidad Relativa	Oxidante (pH 5-8)	Oxidante (pH <4)	Reductor
Muy Móvil ($K > 10$)	Cl, Br, I, S, Rn, He, C, N, Mo, B (Se, Te, Re?)	Cl, Br, I, S, Rn, He, C, N, B	Cl, Br, I, Rn, He
Moderadamente Móvil ($K = 1-10$)	Ca, Na, Mg, Li, F, Zn, Ag, U, V, As, (Sr, Hg, Sb?)	Ca, Na, Mg, Sr, Li, F, Zn, Cd, Hg, Cu, Ag, Co, Ni, U, V, As, Mn, P	Ca, Na, Mg, Li, Sr, Ba, Ra, F, Mn
Ligeramente Móvil ($K = 0.1-1$)	K, Rb, Ba, Mn, Si, Ge, P, Pb, Cu, Ni, Co, (Cd, Be, Rn, In, W?)	K, Rb, Ba, Si, Ge, Ra	K, Rb, Si, P, Fe
Inmóvil ($K < 0.1$)	Fe, Al, Ga, Sc, Ti, Zr, Hf, Th, Pa, Sn, TR**, gpo. Pt, Au, (Cr, Nb, Ta, Bi, Cs)	Fe, Al, Ga, Sc, Ti, Zr, Hf, Th, Pa, Sn, TR**, gpo Pt, Au, As, Mo, Se	Fe, Al, Ga, Ti, Zr, Hf, Th, Pa, Sn, TR**, gpo Pt, Au, Cu, Ag, Pb, Zn, Cd, Hg, Ni, Co, As, Sb, Bi, U, V, Se, Te, Mo, In, Cr, (Nb, Ta, Cs)

(*) De: Perel'man (1967), modificado por Rose et al (1979), tomado de Siegel (1992).

(**) Tierras Raras.

5.5.1 Comportamiento en los Magmas

Se asume que las abundancias de las “tierras raras” en los meteoritos condritos, que representan el material primitivo del Sistema Solar, deben ser iguales a las que habían en la Tierra primitiva. Estas abundancias se habrían enriquecido por igual después de la diferenciación primordial núcleo-manto y posteriormente cualquier fusión parcial del manto tendría como consecuencia un marcado aumento de la concentración de las “tierras raras” en la fracción fundida, como ocurre con todos los elementos incompatibles, siendo la concentración tanto mayor cuando menos sea la proporción del fundido.

Las abundancias relativas de las “tierras raras” entre sí deben permanecer inalteradas por la fusión parcial o por otros procesos. Los únicos procesos que pueden alterar esta proporción son el reparto diferencial de las “tierras raras” entre el fundido y los minerales del manto, es decir, el coeficiente de reparto $D = \text{mineral/fundido}$.

En un magma, el grado de enriquecimiento de una tierra rara en particular se compara respecto a las abundancias condriticas y es función de los siguientes factores:

- a) Concentración inicial del elemento en la fuente.
- b) Grado de fusión parcial.
- c) Cristalización fraccionada de un determinado mineral.

Los elementos lantánidos se concentran en fracciones cristalinas tardías y en fusiones residuales, según las reglas de Goldschmidt para la sustitución de elementos en los retículos cristalinos, las “tierras raras” que tienen radios iónicos que varían de 1,03 a 0,86 Å pueden sustituir al Ca^{2+} (0,99 Å), Zr^{4+} (0,72 Å), U^{4+} (0,89 Å), Th^{4+} (0,94 Å) e Y^{3+} (0,90 Å), pero el hecho que el enlace de las “tierras raras” con el oxígeno sean más covalentes que con el calcio y la dificultad del balance de carga de los iones trivalentes en los retículos de coordinación 8, hacen que ya que no puedan ser camufladas por el Ca^{2+} , además de sus mayores electronegatividades.

Los procesos de fusión parcial y de cristalización fraccionada de los magmas y de las rocas ígneas, llevan a un enriquecimiento relativo de las “tierras raras” ligeras (TRL) en la fase líquida de los sistemas silicatados cristal/líquido. De este modo, hay un enriquecimiento de TRL en rocas corticales, particularmente en las más félsicas. Debido

a la incorporación preferencial de las “tierras raras” de mayores radios iónicos en la fase líquida. En las rocas básicas y ultrabásicas las “tierras raras” están predominantemente distribuidas en los minerales esenciales, en cuanto a las rocas ácidas y en especial en las rocas alcalinas estos elementos están concentrados en los minerales accesorios.

En los minerales esenciales como en los férricos se concentran preferentemente como “tierras raras” pesadas (TRP) e intermedias (TRI), en cuanto a los silícicos prefieren las “tierras raras” ligeras (TRL).

El Sc (0.74 Å) debido a su radio iónico mucho más pequeño, es capturado principalmente por los retículos conteniendo Fe^{2+} y lo que lleva a un decrecimiento de su concentración durante la cristalización fraccionada.

La composición mineral de una fusión depende de una serie de factores tales como: una concentración de elementos trazas en el material fuente, una intensa fusión parcial de fases sólidas que permanecen después de la remoción del fundido, de cualquier diferenciación que ocurra antes de la cristalización completa de la fusión y de cualquier interacción de las rocas con otras fusiones y fluidos. Con esto se quiere resaltar en general, que los contenidos de los elementos trazas en las rocas si bien es cierto están distribuidos según la paragénesis y los coeficientes de reparto, sin embargo el factor determinante corresponde a los procesos que estuvo sometido el líquido antes de la cristalización completa (Rivera, 2007).

5.5.2 Coeficiente de Partición o Reparto

El coeficiente de reparto o partición de las “tierras raras” (D) es el único proceso que puede alterar las abundancias relativas de las “tierras raras” entre el fundido y los minerales del manto y este coeficiente está supeditado al radio iónico y a la carga eléctrica o valencia de los elementos “tierras raras”.

a) Radio Iónico, una de las causas que condicionan el valor del coeficiente de reparto y por ende el ingreso de las “tierras raras” en la red mineral. El radio iónico disminuye progresivamente desde las TRL, TRI y TRP, constituyendo el fenómeno llamado “contracción lantánida”.

Las “tierras raras” ligeras (TRL) que tienen mayor radio iónico se introducen en los

feldespatos y en el apatito. También en la esfena hay una fuerte concentración de TRL por lo que fracciona fuertemente las TRP. También el circón puede fraccionar las TRL en líquidos muy evolucionados.

Los feldespatos tienen bajo coeficiente para todas las “tierras raras”, excepto para el Eu. Por tanto la cristalización del feldespato tiene un efecto muy pequeño en el diagrama de las “tierras raras” del fundido residual, excepto que produce una “*anomalía negativa de Eu*”. Puesto que, solo el Eu^{2+} es el que interviene en los feldespatos, cuando el magma tiene mayor fugacidad del oxígeno y mayor temperatura, el Eu está como Eu^{3+} y la anomalía negativa se hace más marcada.

El granate admite en su red a las TRP, que tiene un radio iónico relativamente menor, pero no admite a las TRL que quedan por lo tanto relativamente concentrados en el fundido. Lo mismo ocurre con los clinopiroxenos y ortopiroxenos pero en una menor proporción, ya que ambos minerales tienen generalmente $D < 1$, siendo los valores para las TRL más bajos que para las TRP. El olivino no ejerce ningún efecto de fraccionamiento de las “tierras raras”, ya que todos ellos tienen $D < 0.1$ en el olivino.

El coeficiente de reparto para las “tierras raras” en la hornblenda en sistemas ricos en SiO_2 puede ser > 10 . Por tanto, la cristalización fraccionada de hornblenda a partir de magmas de composición intermedia puede llevar a una disminución relativa de “tierras raras”. La biotita tiene bajos coeficientes de reparto para las “tierras raras” por lo que su presencia no influye en el diagrama de las “tierras raras” (Rivera, 2007).

b) Carga eléctrica, es otra de las causas que condicionan la entrada de las “tierras raras” en las redes minerales. Todas las “tierras raras”, excepto el Eu y el Ce son trivalentes, en todas las condiciones geológicas. El Ce bajo condiciones fuertemente oxidantes puede ser tetravalente.

La distribución del Eu es particularmente interesante, porque puede ser en parte divalente y en parte trivalente. La relación de $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ depende de la fugacidad del oxígeno del magma. Sólo cuando el Eu es divalente tiende a seguir al Sr^{2+} en su comportamiento geoquímico. Tiene un tamaño bastante próximo al del calcio para que le sea permitida la entrada en la red de la plagioclasa. Por tanto, la cristalización de las plagioclasas en un magma ocasiona una «*anomalía negativa*» de Europio.

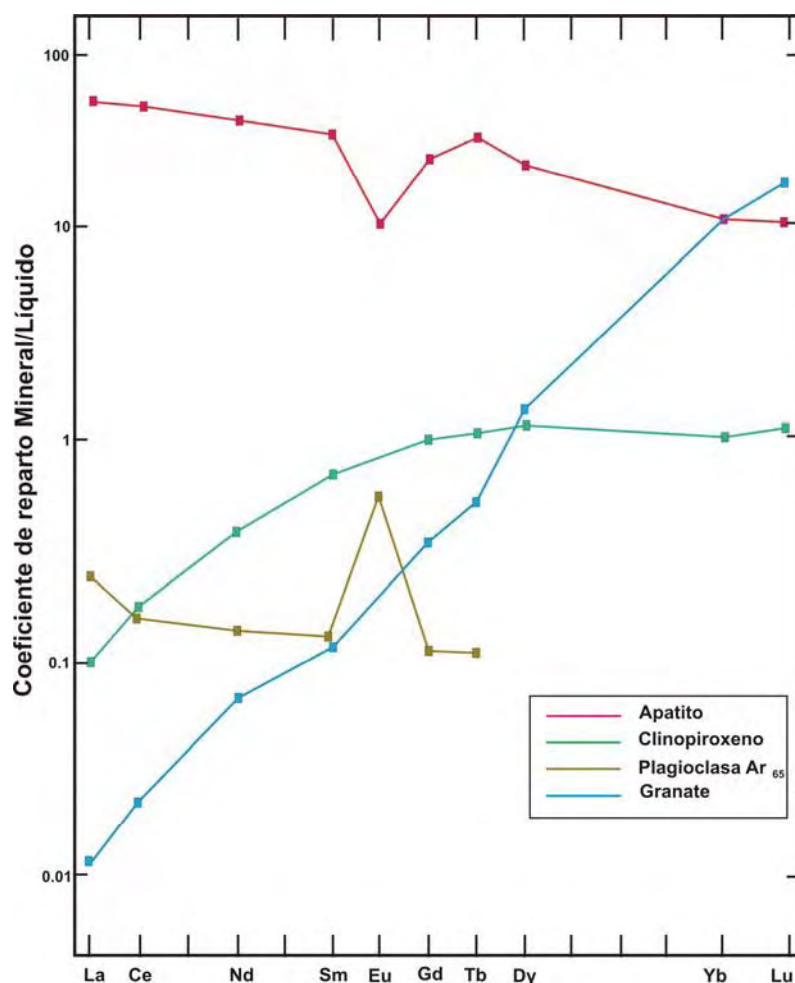


Figura 6 Coeficientes de reparto cristal/líquido de las “tierras raras” en algunos de los minerales ígneos más comunes.

Durante procesos secundarios como alteraciones y metamorfismo, las TRP se comportan como inmóviles, por lo que su estudio es especialmente interesante en rocas volcánicas antiguas para tratar de identificar su posición paleotectónica. En cambio las TRL probablemente son móviles y por lo tanto, no son útiles para los diagramas discriminarios.

En la figura 6 se aprecia la tendencia de las “tierras raras” a ser aceptadas por determinados minerales. La magnitud del efecto producido por un mineral particular en la forma de diagrama de abundancia de las “tierras raras” va a depender de la abundancia relativa y del valor del coeficiente de reparto para un elemento en particular.

5.6 PRODUCCIÓN, RECURSOS Y APLICACIONES ECONÓMICAS DE LAS “TIERRAS RARAS” A NIVEL MUNDIAL

En los Estados Unidos durante el año 2006 no se efectuó minado alguno por “tierras raras”. La Bastnasita, es un mineral fluocarbonatado de “tierras raras”, fue extraído con anterioridad y se procesó como producto primario en Mountain Pass, CA. Los Estados Unidos continuaron siendo los mayores exportadores y consumidores de productos de “tierras raras” en el año 2006 (ver tabla 4 y figura 8). El valor estimado de “tierras raras” refinadas y consumidas en los Estados Unidos sobrepasa los \$ mil millones, ver tabla 5. Basado en los datos reportados al final del año 2005, la estimación de la distribución de “tierras raras” según su uso final es como sigue: conversores catalizadores de automotores, 32%; aditivos metalúrgicos y aleaciones, 21%; pulidores de cerámicas, 14%; encendedores, televisores, monitores de computadoras, radar, y películas intensificadoras de rayos X, 10%; catalizadores en la refinación del petróleo, 8%; imanes permanentes, 2%; y otros, 13%, ver figura 7.

Las “tierras raras” son relativamente abundantes en la corteza terrestre, pero las concentraciones económicas son menos comunes con respecto a la mayoría de las otras menas. Los recursos a nivel mundial se encuentran principalmente en la bastnasita y monacita.

La Bastnasita existe en depósitos de China y los Estados Unidos los que constituyen el porcentaje de recursos económicos más grande de “tierras raras” del mundo, mientras que la monacita se halla en Australia, Brasil, China, India, Malasia, Sudáfrica, Sri Lanka, Thailandia, y los Estados Unidos, constituyendo el segundo sector más grande (tabla 3).

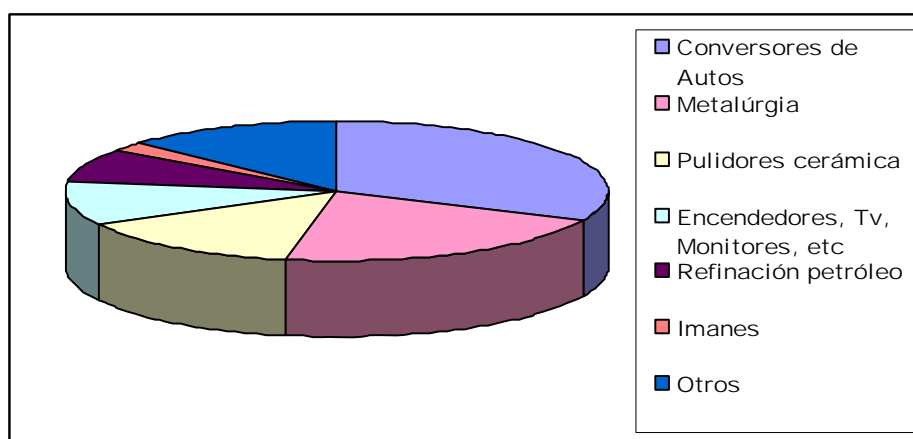


Figura 7 Principales Usos de las “tierras raras” en EE.UU. durante el 2005

Apatito, cheralita, eudialita, monacita secundaria, loparita, fosforitas, soluciones de uranio gastadas, y xenotima constituyen la mayoría de los recursos restantes (Hedrick, 2005).

Tabla 3 Producción y Reservas de “tierras raras” a Nivel Mundial.

	Producción Minera*		Reservas (10 ⁶ Ton cúbicas)	Reservas Base (10 ⁶ Ton cúbicas)
	2005	2006		
EE.UU.	-	-	13	14
Australia	-	-	5.2	5.8
China	119000	120000	27	89
Com. Nac.Indep.	NA	NA	19	21
India	2700	2700	1.1	1.3
Malasia	750	200	0.03	0.35
Tailandia	-	-	NA	NA
Otros	400	400	22	23
Total Mundial	123000	123000	88	150

(*) En Toneladas Cúbicas

Tabla 4 Exportación e Importación de los Principales Compuestos de “tierras raras” en EE.UU.

Exportación, óxidos base de “tierras raras”:	Tonelada Métrica	2001	2002	2003	2004	2005
Compuestos de Cerio	do.	4120	2740	1910	2280	2220
Metales de “tierras raras”, escandio, itrio	do.	884	1300	730	1010	636
Compuestos de “tierras raras”, orgánicos e inorgánicos	do.	1600	1304	1790	4800	2070
Ferrocerio y aleaciones pirofóricas	do.	2500	2830	2808	3720	4320
Importaciones para consumo, “tierras raras” base:						
Compuestos de Cerio	do.	3850	2540	2430	1880	2170
Ferrocerio y aleaciones pirofóricas	do.	118	89	102	105	130
Metales, aleaciones, óxidos, otros compuestos	do.	15300	11600	14100	15300	13000
Precios a fines de año:						
Concentrado de Bastnasita, óxidos base de “tierras raras”	Dólar por Kilogramo					
Concentrado de Monacita, óxidos base de “tierras raras”	do.	\$5.51	\$5.51	\$5.51	\$5.51	\$5.51
Mischmetal, metales base	do.	\$0.73	\$0.73	\$0.73	\$0.73	\$0.73
		\$16.00	\$16.00	\$10.00	\$10.00	\$10.00

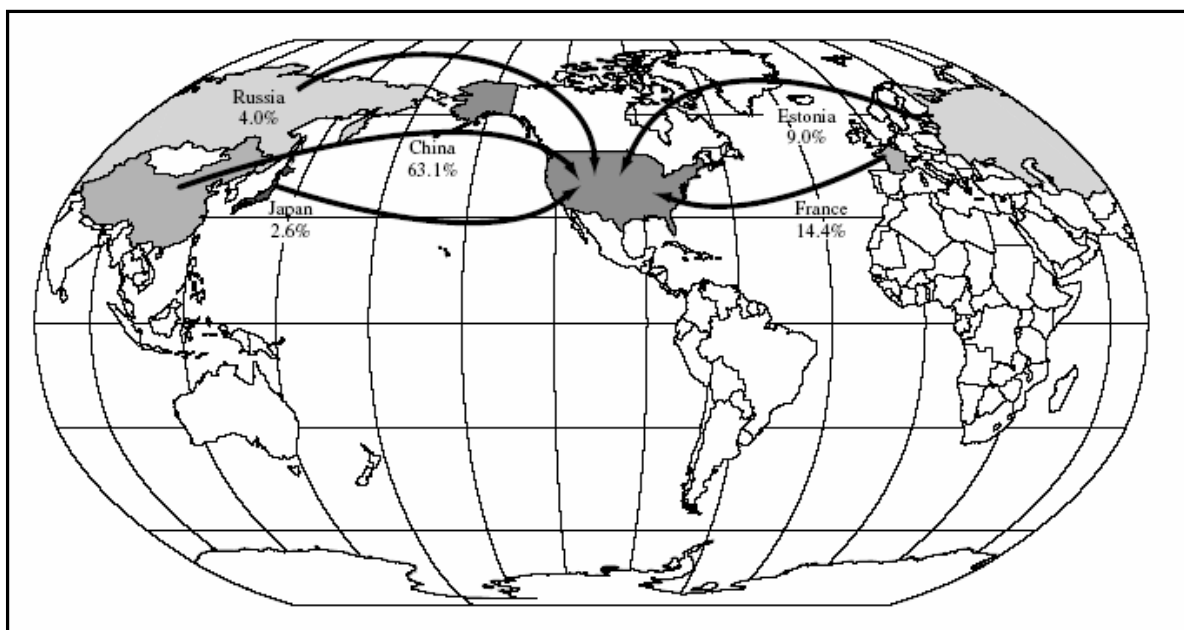
Tomado de U.S. Geological Survey Minerals Yearbook—2005

Tabla 5 Precios de los Óxidos de las “tierras raras” en el año 2005

Producto (óxido)	Pureza (%)	Cantidad del Paquete Estándar (kg)	Precio (\$ por kg)
Cerio	96.00	25	19.20
Do.	99.50	900	31.50
Disprosio	99.00	3	120.00
Erbio	96.00	2	155.00
Europio	99.99	1	990.00 ¹
Gadolinio	99.99	3	130.00
Holmio	99.90	10	440.00 ²
Lantano	99.99	25	23.00
Lutecio	99.99	2	3500.00
Neodimio	95.00	20	28.50
Praseodimio	96.00	20	36.80
Samarario	99.90	25	360.00
Do.	99.99	25	435.00
Escandio	99.99	1	6000.00
Terbio	99.99	5	535.00
Tulio	99.90	5	2300.00
Iterbio	99.00	10	340.00
Itrio	99.99	50	88.00

¹ El precio para una cantidad mayor de 40 kilogramos es \$900 por Kilogramo.

² El precio para la cantidad mayor de 40 kilogramos es \$485.00 por Kilogramo.

**Figura 8 Principales fuentes de importación hacia EE.UU. de “tierras raras”**

CAPÍTULO VI

METODOLOGÍA DE TRABAJO

6.1 PROSPECCIÓN GEOQUÍMICA REGIONAL DE SEDIMENTOS

Bajo un criterio de prospección geoquímica regional, la primera fase de trabajo consistió en la elaboración de un diseño de muestreo geoquímico a una escala regional donde se definieron los lugares a muestrear, siguiendo una densidad de muestreo de 1 muestra/10 km². Según esto se recolectó un total de 283 muestras de sedimentos activos de quebrada en toda la cuenca, ver Mapa 2.

En cada lugar de muestreo se ha tomado información referida a la ubicación, características del sedimento, rodados, así como del entorno geológico, entre otros. Con esta información se asignó a cada una de las muestras la respectiva fuente primaria, según la unidad lito-estratigráfica de aporte de los sedimentos predominantes, el que finalmente es analizado en el laboratorio (INGEMMET, 2005).

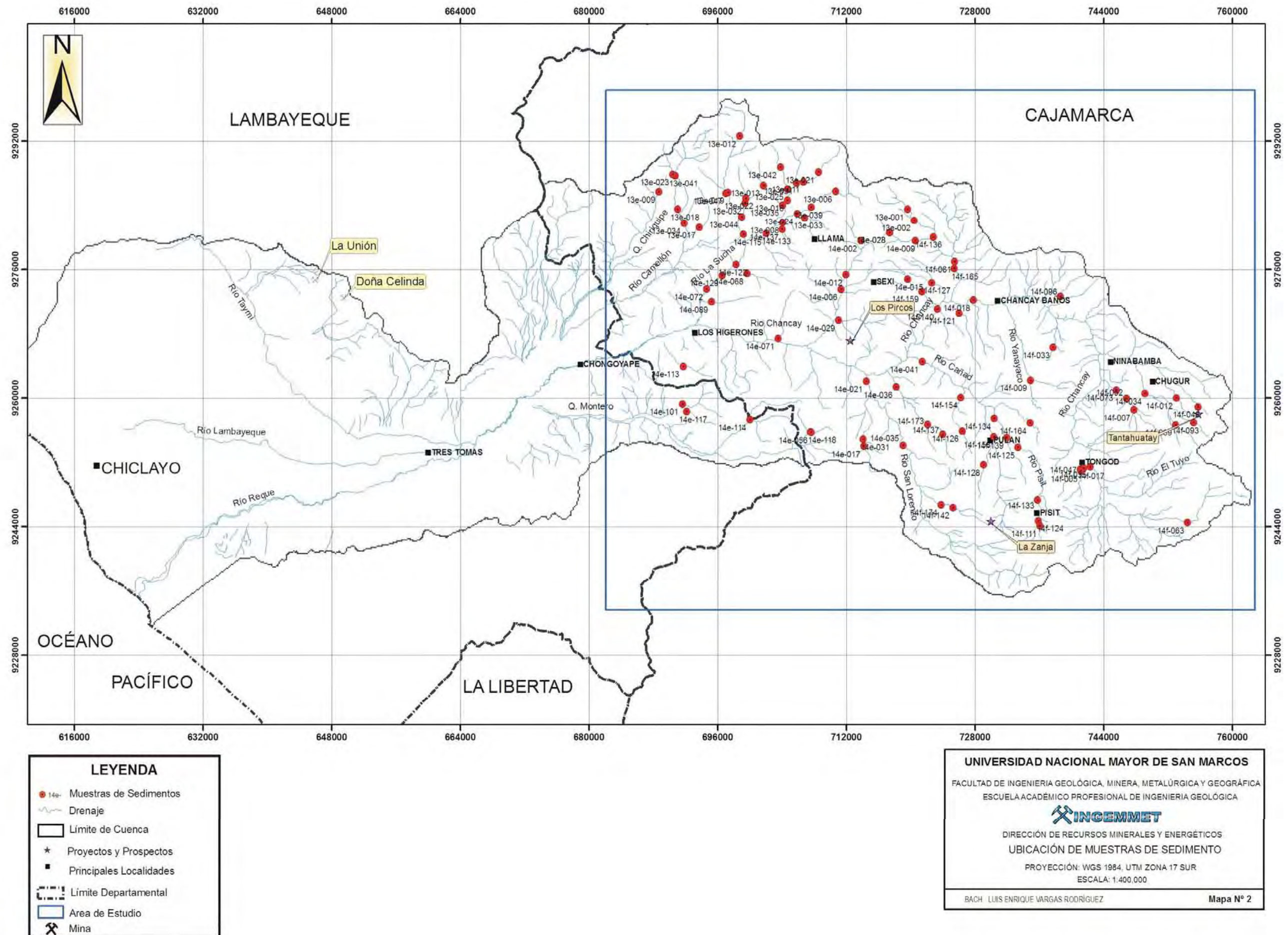
Es necesario destacar que la influencia de las variaciones en la topografía, grado de meteorización, la naturaleza de la superficie del sistema de drenaje y el tipo de muestra parece ser secundaria con respecto a la influencia del control geológico dominante en la zona a estudiar (Armour-Brown & Nichol, 1970).

Con la información de campo y los resultados analíticos, se procede a efectuar el procesamiento estadístico de los datos, con la finalidad de caracterizar la dispersión geoquímica secundaria de los elementos lantánidos.

6.2 MUESTREO DE SEDIMENTOS ACTIVOS DE QUEBRADA

Los sedimentos activos han sido tomados de quebradas tanto de primer, segundo, tercer o cuarto orden, con presencia de agua o quebradas secas, siendo tamizadas en campo con tamices 30; se utilizó floculante con la finalidad de no perder la fracción granulométrica más fina contenida en el sedimento, mediante la aglutinación y posterior decantación de éstas.

Las muestras húmedas fueron colocadas en bolsas microporosas, mientras que las muestras secas lo fueron en bolsas de polietileno, debidamente codificadas y sellada, e peso mínimo de cada muestra ha sido de 4 kg.



A continuación se describe el protocolo de muestreo en campo (INGEMMET, 2005):

- a) Ubicarse en el punto de muestreo según el mapa diseñado, tomando las coordenadas con el GPS.
- b) Graficar la ubicación de la muestra en el mapa base.
- c) Anotar las coordenadas y la información referida a la ubicación en la “ficha de muestreo de campo para sedimentos”.
- d) En la zona de muestreo (río o quebrada) se procede a lo siguiente: Seleccionar los lugares adecuados en el cauce de la corriente, preferentemente en zonas de menor energía, donde se depositen los sedimentos, los que no evidencien contaminación de una u otra margen por parte del material aluvial, coluvial o eólico (Fotografía 1).
- e) El espaciamiento es variable dependiendo del área a estudiar. Para trabajos geoquímicos regionales, se considera una muestra por cada 10 km².
- f) **Limpiar el equipo de muestreo.**
- g) Tomar la muestra de sedimentos que pasen por la malla 30. La recolección de los sedimentos debe ser en varios lugares alrededor del punto de muestreo (3 o más), abarcando 50 m de escorrentía (ver Fotografía 2); en ningún caso la muestra debe tomarse en un solo punto de muestreo. A continuación se detalla como obtener las muestras de sedimento:
 - i. Se debe retirar la capa superior de sedimento (10-20 cm), utilizando instrumentos de polietileno o madera, puesto que esta cobertura puede contener altas concentraciones de óxidos de Fe y Mn, contaminaciones superficiales. Además que las relaciones de los elementos traza varían si se muestrean bancos de sedimentos con materiales coluviales (Armour-Brown & Nichol, 1970).
 - ii. El operador deberá usar durante el proceso de muestreo guantes de goma resistentes para proteger sus manos y prevenir cualquier tipo de contaminación. Además no deberá portar objeto alguno que pueda contaminar el sedimento (Fotografía 3).
 - iii. Previamente al tamizado debemos retirar cuidadosamente (a mano) los clastos gruesos; durante el tamizado se recomienda emplear cantidades mínimas de agua, lo suficiente como para facilitar el paso de los sedimentos, durante este

proceso se puede frotar el sedimento con los guantes, evitando que se introduzca material grueso al recipiente que se encuentra debajo del tamiz. El recipiente deberá ser de plástico.

- iv. Para el caso de material seco se procede de la misma forma, siempre evitando que el material grueso ingrese en el recipiente.
- v. El tamizado termina cuando se obtenga entre 3.5 a 4.5 kg. de sedimento en el recipiente, luego este se deja reposar para que decanten los sedimentos finos; es recomendable para estos casos, aplicar una solución floculante para acelerar el proceso de decantación.
- vi. El sedimento es colocado en una bolsa microporosa o de polietileno para el caso de muestras húmedas o secas respectivamente (Fotografía 4).
- vii. Al terminar el muestreo, todo el equipo debe ser lavado en la corriente antes de ser embalado y transportado hacia otro lugar. Para quebradas secas, el equipo es cepillado con una escobilla de cerdas de plástico, donde la primera cantidad de sedimento que pase a través de los tamices debe ser desechado.
- viii. Para el caso de muestras duplicadas, estas se deben recolectar de la misma forma que las originales (en los mismos puntos).
- g) Rotular la muestra indicando el código, según la “Matriz de control” preparada previamente.
- h) Completar los campos restantes de la “Ficha de muestreo de Sedimentos” con información referida a pH, TDS, Conductividad Eléctrica, óxidos de hierro, óxidos de manganeso, contenido de materia orgánica, ancho del cauce, flujo de corriente, porcentaje, forma, tipo litológico, presencia de alteración y mineralización en rodados y sedimentos finos, entorno geológico, estructuras y algún otro dato adicional que se considere importante señalar en la parte de comentarios.
- i) Acondicionar las muestras, agruparlas y colocarlas en los respectivos sacos.
- j) **Enviar las muestras al laboratorio.**

Nota: Es necesario mencionar que en gabinete previo al envío de las muestras de campo al laboratorio se deben insertar las muestras de control de calidad (“blancos” y estándares). El “blanco” es una muestra de cuarzo granulado que se coloca en una bolsa y se codifica de la misma forma que una muestra de campo. Con la muestra estándar se procede igualmente.



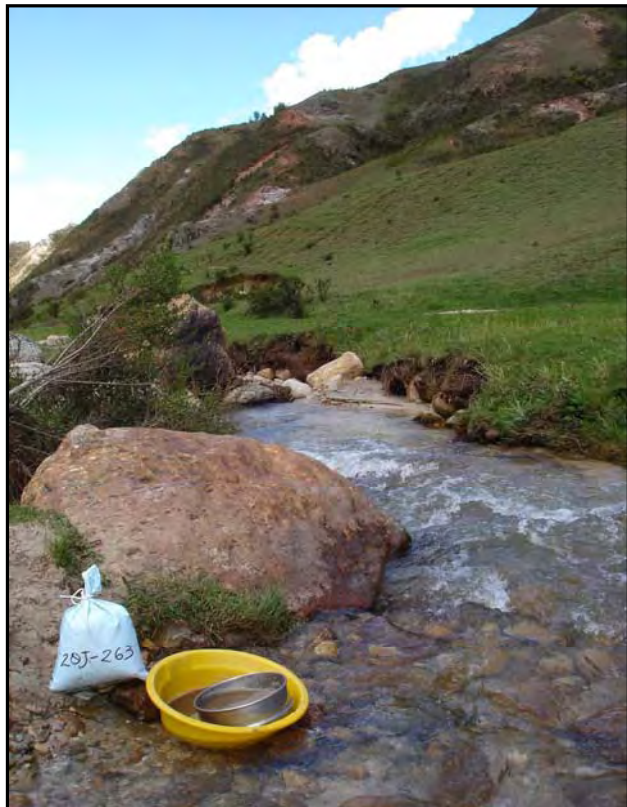
Fotografía 1. Zona de menor energía de la corriente y de acumulación de sedimentos, libre de presencia de material coluvial, aluvial o eólica, idónea para extraer una muestra de sedimentos.



Fotografía 2. Recolección de sedimentos en varios lugares alrededor del punto de muestreo (3 o más), abarcando 50 m de escorrentía.



Fotografía 3. Toma de sedimentos de quebrada en campo, empleando un tamiz de malla 30, recipientes de plástico y guantes de goma.



Fotografía 4. Sedimentos de quebrada húmedos, los que después de ser tamizados son colocados en bolsas microporosas, las que facilitan la expulsión del agua sin perder la fracción fina de sedimento.

6.3 PROCEDIMIENTOS ANALÍTICOS

Se ha visto por conveniente que a las muestras de sedimento se les haga un ataque con agua regia para, posteriormente, determinar los elementos mayores y traza por el método ICP- Espectrometría de Masa, mientras que para la determinación de oro se utilizó la técnica de Ensayo al fuego y Espectrometría de Absorción Atómica.

6.3.1 Ataque Químico

A) Digestión Con Agua Regia

La digestión de agua regia consiste en el tratamiento de una muestra de sedimentos con una mezcla de 3:1 de ácido hidroclicóric y ácido nítrico. El ácido nítrico destruye la energía orgánica y las sustancias con óxidos de sulfuro que en reacción con concentrados de ácido hidroclicóric genera el Agua Regia.

El agua regia puede proveer un mejoramiento de la anomalía en algunos ambientes geológicos, siendo un solvente efectivo para muchos sulfatos, sulfuros, óxidos y carbonatos, suministrando una digestión parcial para muchos elementos formadores de roca de una naturaleza refractaria.

6.3.2 Métodos analíticos

A) Espectrometría de Masa- Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-MS)

La espectrometría de masas (MS, *mass spectrometry*) se basa en la ionización de los componentes de la muestra y en la posterior separación de los iones obtenidos en función de su relación masa-carga. Los iones son transportados mediante campos eléctricos y canales de vacío hasta el analizador de masas.

El ICP-MS es un instrumento muy poderoso para el análisis multielemental de trazas (ppb-ppm). El plasma consiste de iones, electrones y partículas neutrales formadas a partir del gas Argón y se utiliza para atomizar e ionizar los elementos en una muestra (fotografía 5). Los iones resultantes pasan a un espectrómetro de masa donde son separados y recolectados de acuerdo a su cociente masa/carga.



Fotografía 5. Laboratorio analítico de ICP-MS, equipo Perkin Elmer ELAN DCR-e

De esta forma se pueden identificar los constituyentes en una muestra. Los isótopos de los elementos son identificados por su proporción de masa a carga (M/E) y la intensidad de un pico específico en el espectro masivo es proporcional a la cantidad de ese isótopo (elemento) en la muestra original.

Con este método se pueden determinar un total de 52 elementos, los cuales se pueden apreciar en la Tabla 6, con sus correspondientes límites de detección.

Tabla 6 Límites de detección para muestras de sedimento

Elemento	L.D.*	Elemento	DL.*
Ag	0.01 – 10 ppm	Mo	0.05 ppm - 1%
Al	0.01 - 15%	Na	0.01% - 15%
As	0.1 ppm - 1%	Ni	0.5 ppm - 1%
B	10 ppm - 1%	Nb	0.05 ppm - 0.1%
Ba	5 ppm - 1%	P	50 ppm - 1%
Be	0.1 ppm - 0.01%	Pb	0.2ppm - 1%
Bi	0.02 ppm - 1%	Rb	0.2ppm - 1%
Ca	0.01 ppm - 15%	S	0.01% - 5%
Cd	0.01 ppm - 1%	Sb	0.05 ppm - 1%
Ce	0.05 ppm - 0.1%	Sc	0.1 ppm - 1%
Cs	0.05 ppm - 0.1%	Se	1 ppm - 0.1%
Cr	1 ppm - 1%	Sn	0.3 ppm - 0.1%
Co	0.1 ppm - 1%	Sr	0.5 ppm - 1%
Cu	0.5 ppm - 1%	Ta	0.05 ppm - 1%
Fe	0.01% - 15%	Tb	0.02 ppm - 1%
Ga	0.1 ppm - 1%	Te	0.05 ppm - 0.1%
Ge	0.1 ppm - 1%	Th	0.1 ppm - 1%
Hg	0.01 ppm - 1%	Ti	0.01% - 15%
Hf	0.05 ppm - 0.05%	Tl	0.02 ppm - 1%
In	0.02 ppm - 0.05%	U	0.05 ppm - 1%
K	0.01% - 15%	V	1 ppm - 1%
La	0.1 ppm - 1%	W	0.1 ppm - 1%
Li	1 ppm - 5%	Y	0.05 ppm - 1%
Lu	0.01 ppm - 0.1%	Yb	0.1 ppm - 0.01%
Mg	0.01% - 15%	Zn	1 ppm - 1%
Mn	5 ppm - 1%	Zr	0.5 ppm - 1%

* Digestión con Agua Regia + ICP-MS

B) Espectrometría de Absorción Atómica (AAS)

La absorción atómica es una técnica analítica espectrofotométrica que permite la determinación de metales. Está especialmente indicada para determinar elementos alcalinos, alcalinotérreos y metales pesados presentes en cualquier tipo de muestra previamente disuelta. Los niveles que se pueden analizar van desde % hasta ppb (1 mg/tonelada). Se basa en la producción de un estado excitado de un átomo causada por la absorción de un fotón por el átomo. Cuando luz, que contiene el espectro del elemento específico pasa por una mezcla de gas de átomos no excitados de este elemento específico, las longitudes de ondas características para este elemento son absorbidas parcialmente produciendo de tal modo el espectro de líneas característico para este elemento (fotografía 6)

Para la mayoría de los elementos el espectro de líneas se ubica en la región ultravioleta y de la luz visible del espectro electromagnético. Como la intensidad de la absorción depende directamente de la cantidad de átomos presentes y capaces de absorber, la extinción de la muestra y la concentración del elemento específico están relacionadas linealmente. A través de calibración se obtiene la concentración del elemento en la muestra.



Fotografía 6. Laboratorio analítico de AAS, equipo Perkin Elmer Analyst 100.

C) Ensayo Al Fuego

Las muestras se mezclan con agentes fundentes que incluyen el óxido de plomo y se funden a alta temperatura en un horno de gas. El óxido de plomo se reduce a plomo metálico, el cual colecta el metal precioso. Los metales preciosos se separan del plomo mediante un procedimiento llamado copelación, que consiste en la sublimación selectiva de este último. La técnica final que ha sido utilizada para determinar el contenido de metal precioso, es por Espectrometría de Absorción Atómica (AAS) o Espectrometría de Emisión Atómica por ICP (ICP – AES).

En la determinación de oro por el método combinado Ensayo al Fuego – Absorción Atómica se pueden alcanzar y reportar contenidos en un rango de 5 -5 000 ppb.

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 ESTADÍSTICA DEL ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD

El aseguramiento y control de calidad es un aspecto muy importante, toda vez que involucra el debido cuidado a tenerse en cuenta en las diversas etapas del estudio, desde el diseño de muestreo hasta la elaboración de mapas geoquímicos y presentación de resultados.

El control de calidad involucró además la utilización de tres tipos de materiales: duplicados, estándares y blancos, cada uno de ellos para controlar la precisión, exactitud y contaminación de nuestros resultados respectivamente y así poder validarlos como información confiable.

La cantidad de muestras de control representó el 10% de las muestras totales, teniéndose así en cada lote de 30 muestras, tres muestras de control es decir, un duplicado, un estándar y una muestra “blanco”, ver fotografía 7.

Como referencia debemos mencionar que el universo estadístico está representado por toda la cuenca Chancay-Lambayeque de donde se recolectaron 283 muestras de sedimento a las se adicionaron 41 muestras de control (14 estándares, 14 blancos y 13 duplicados), de manera que cada sub-cuenca ha quedado cubierta por el control de calidad diseñado para este proyecto.

Es necesario mencionar que un control de calidad bien ejecutado permitirá evitar que se produzcan errores e ineficiencias, identificando y eliminando sus causas, evidenciar objetivamente que se ha cumplido con los estándares de calidad y finalmente brindar confiabilidad a los usuarios de la información final.

Para la obtención de información confiable, como parte de este estudio se consideró la aplicación de procedimientos para la reducción de errores sistemáticos, tanto en la etapa de campo como en el análisis de muestras; por esa razón, durante el diseño de muestreo, la codificación de las muestras fue asignada de manera aleatoria (randomización).

En base al principio de randomización o asignación aleatoria de los códigos, es que la numeración correlativa de las muestras nunca representará el orden en que estas fueron tomadas en el campo, rompiendo de esta manera la posible acumulación de los errores sistemáticos que puedan afectar los resultados analíticos.

En cuanto al recurso humano que realiza este tipo de trabajos, es necesario contar con personal capacitado y con experiencia, así como la utilización de equipos e instrumentos calibrados previamente, ensayos analíticos y materiales de referencia provenientes de laboratorios reconocidos y certificados. Luego de la aplicación de los procedimientos para el control de calidad de los resultados, estos fueron comparados con los límites y rangos de aceptabilidad para los parámetros de calidad antes mencionados, después de esto los datos de los ensayos analíticos pueden pasar a la etapa del tratamiento estadístico, para su posterior interpretación.

A continuación se discutirán los resultados obtenidos para las diferentes clases de muestras de control, así como su comparación con los rangos de aceptabilidad establecidos para calidad.

7.1.1 Precisión

Para la evaluación de este parámetro de calidad, se recolectaron muestras duplicadas en cada subcuenca, cada una de ellas estuvo constituida de 25 a 30 estaciones de muestreo, que constituyen un lote de muestras independiente y como mínimo cuenta con una muestra duplicada. Cada muestra duplicada nos dará información sobre el grado de repetibilidad de los resultados analíticos, así como la buena aplicación de los protocolos de muestreo del geólogo en el campo a nivel de cada lote de muestras analizadas, las que espacialmente corresponden a subcuencas hidrográficas.

Los valores presentados en la tabla 7, muestran que para el elemento lantano todos los pares de muestras duplicadas se encuentran en el rango de aceptabilidad. Las muestras 14e-109 y 14e-177, presentan una diferencia de 0.16 ppm respecto de los límites permisibles, equivalente a 1.6 veces el límite de detección, siendo estos valores sólo de advertencia los que no comprometen la repetibilidad de los resultados obtenidos (ver figura 9).

Tabla 7 Parámetros de Precisión en muestras de Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento La)

Muestra	Límite de Detección (ppm)	Valores Obtenidos (ppm)	Valor Promedio (ppm)	S.D (ppm)	Tolerancia Permisible* (%)	Límite Mínimo Permisible (ppm)	Límite Máximo Permisible (ppm)
13e-008 13e-048	0.10	12.30 12.20	12.250	0.071	10.00	11.025	13.475
13e-035 13e-049	0.10	12.30 13.70	13.000	0.990	10.00	11.700	14.300
14e-024 14e-046	0.10	12.80 12.70	12.750	0.071	10.00	11.475	14.025
14e-038 14e-045	0.10	12.50 13.60	13.050	0.778	10.00	11.745	14.355
14e-109 14e-177	0.10	5.20 3.20	4.200	1.414	20.00	3.360	5.040
14e-124 14e-176	0.10	6.40 8.80	7.600	1.697	20.00	6.080	9.120
14e-152 14e-173	0.10	15.40 13.60	14.500	1.273	10.00	13.050	15.950
14e-154 14e-175	0.10	13.80 12.20	13.000	1.131	10.00	11.700	14.300
14e-174 14e-064	0.10	9.60 10.40	10.000	0.566	20.00	8.000	12.000
14f-029 14f-099	0.10	12.30 12.90	12.600	0.424	10.00	11.340	13.860
14f-090 14f-100	0.10	11.30 13.50	12.400	1.556	10.00	11.160	13.640
14f-118 14f-177	0.10	16.30 17.10	16.700	0.566	10.00	15.030	18.370
14f-146 14f-175	0.10	15.20 14.40	14.800	0.566	10.00	13.320	16.280

(*)Tolerancia Permisible determinada según el método analítico, ataque húmedo y límite de detección. Expresada en (%) y referida al Valor Promedio.

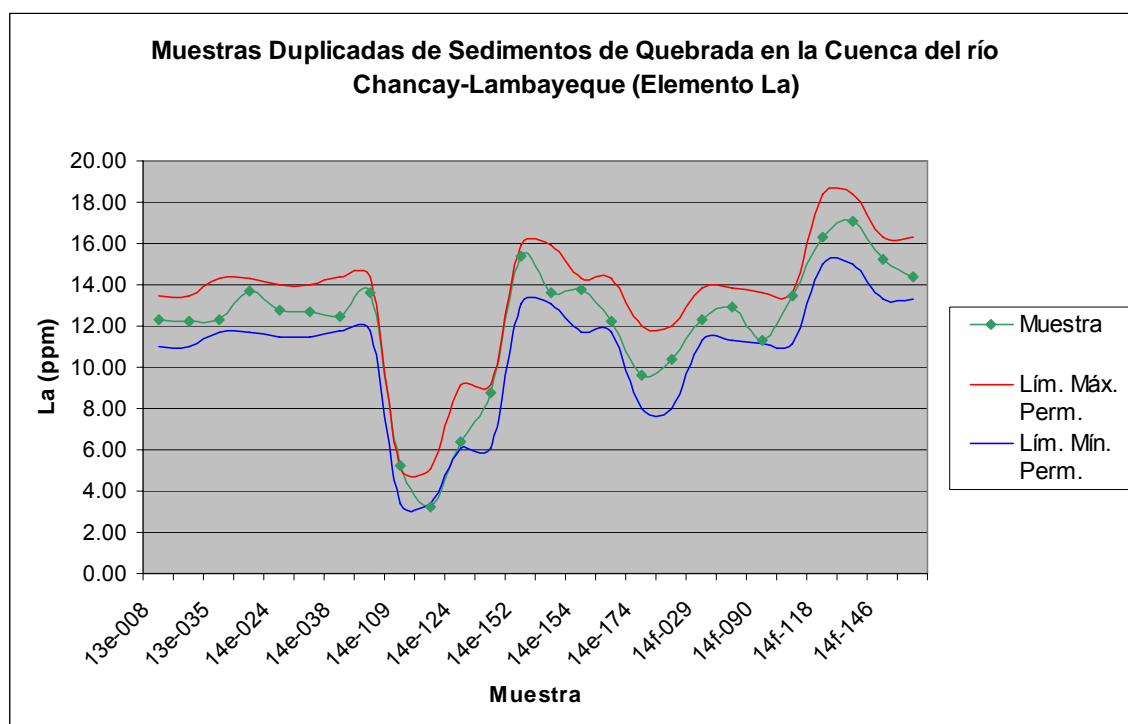


Figura 9 Variabilidad de la precisión en muestras duplicadas-Elemento La

Los resultados para las muestras duplicadas por el elemento cerio, se encuentran en el margen de aceptabilidad, siendo precisos (ver en anexos, tabla A1.1 y figura A1.1).

Los resultados obtenidos para el elemento terbio, demuestran una buena precisión puesto que los resultados analíticos se encuentran dentro de los rangos permisibles (ver en anexos, tabla A1.2 y figura A1.2).

Las lecturas del elemento iterbio en muestras duplicadas, se encuentran dentro de los márgenes de aceptabilidad, demostrándose de esta manera una buena precisión analítica para dicho elemento químico (ver en anexos, tabla A1.3 y figura A1.3).

Los resultados analíticos de las muestras duplicadas para el elemento lutecio, se encuentran comprendidos dentro de los límites permisibles, las muestras 14f-029 y 14f-099 presentan una diferencia de 0.006 ppm, esta cifra es poco significativa con respecto al orden lecturas obtenidas. Este se valor es considerado de advertencia para efectos de precisión analítica, teniéndose de esta manera una precisión aceptable (ver en anexos, tabla A1.4 y figura A1.4).

De la evaluación en la precisión para el escandio, decimos que este elemento presentó una repetibilidad satisfactoria, debido a que todas las parejas de muestras duplicadas se encuentran dentro de los límites aceptables, validando de esta manera los resultados analíticos (ver en anexos, tabla A1.5 y figura A1.5).

Para el caso del elemento itrio su precisión fue aceptable, los resultados obtenidos de las muestras duplicadas se encuentran dentro de los límites permisibles (ver en anexos, tabla A1.6 y figura A1.6).

Todos estos resultados, validan la confiabilidad de los análisis químicos del total de las muestras en términos de precisión analítica. En el anexo 1 se presentan las tablas y figuras referidas a los resultados obtenidos en muestras duplicadas de sedimentos de quebrada para los elementos Ce, Tb, Yb, Lu, Sc e Y.

7.1.2 Exactitud

Este parámetro de calidad fue controlado mediante el empleo de muestras estándares o muestras patrón las cuales fueron adquiridas en laboratorios certificados.

Las muestras estándares controlan la exactitud de los métodos analíticos, el rango de aceptabilidad estuvo determinada por los laboratorios que emiten dichos estándares. Al igual que en las muestras duplicadas, cada lote de muestras cuenta con una muestra estándar como mínimo.

A continuación se discutirán los resultados obtenidos para muestras estándares. Debido a que no se contaron con estándares específicos para elementos lantánidos, se hizo necesario comparar la exactitud de los elementos Cu, Pb, Zn y Ni, teniéndose de esta manera una referencia en cuanto a la exactitud analítica.

Las concentraciones de cobre reportadas en las muestras estándares para sedimentos de quebrada, demostraron ser exactas, puesto que dichos resultados se encuentran dentro de los límites permisibles (ver tabla 8 y figura 10).

Los resultados de las concentraciones de plomo obtenidos en las muestras estándares se encuentran dentro de los límites de aceptación, la muestra 13e-010 tuvo una diferencia por defecto de 0.40 ppm, cifra poco significativa, debido a que ésta es igual a dos veces el límite de detección, resultando ser un valor de advertencia en cuanto a exactitud se refiere (ver anexos, tabla A1.7 y figura A1.7).

Tabla 8 Parámetros de Exactitud en Muestras "Estándares" para Sedimentos de Quebrada de la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Cu)

Muestra	Límite de Detección (ppm)	Valores Obtenidos (ppm)	Valor Promedio (ppm)	S.D (ppm)	Límite Mínimo Permisible* (ppm)	Límite Máximo Permisible* (ppm)
14e-100	0.50	134.20	160.00	26.00	108.00	212.00
14e-080	0.50	127.10	160.00	26.00	108.00	212.00
14f-010	0.50	85.20	95.00	10.00	75.00	115.00
13e-030	0.50	77.10	95.00	10.00	75.00	115.00
13e-010	0.50	281.70	311.00	18.00	275.00	347.00
14f-120	0.50	136.80	160.00	26.00	108.00	212.00
14e-010	0.50	127.40	160.00	26.00	108.00	212.00

* Límites Permisibles establecidos según la relación: Valor Promedio +/- 2S.D

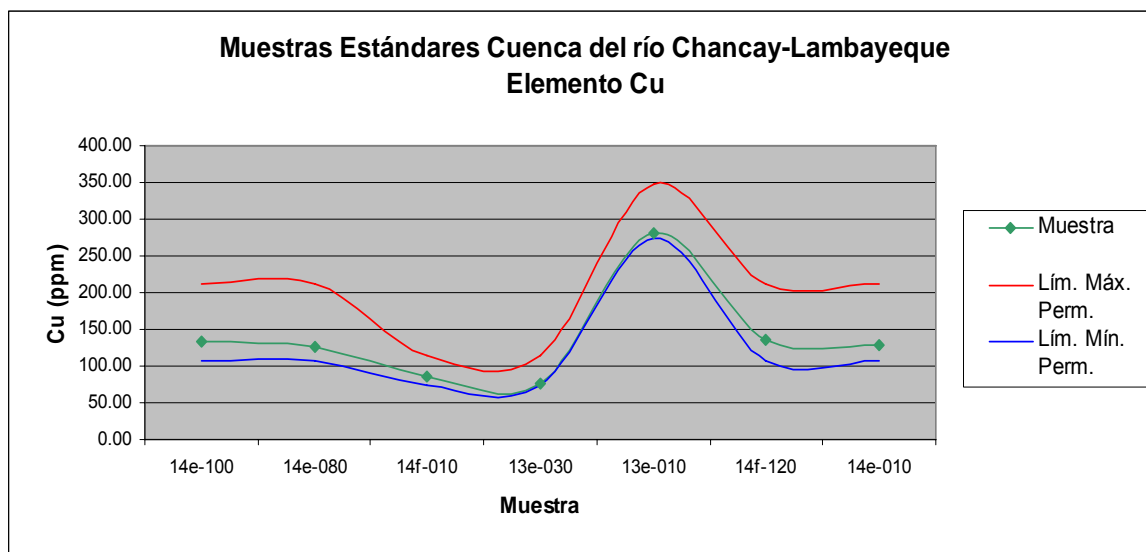


Figura 10 Patrones de exactitud en muestras estándares-Elemento Cu

Las concentraciones de zinc obtenidas en las muestras estándares no exceden los límites permisibles excepto la muestra 13e-010, la que presenta una diferencia porcentual por defecto de 2.8 % con respecto al límite mínimo permisible, representando éste un valor de advertencia (ver en anexos, tabla A1.8 y figura A1.8).

Los resultados muestran que para el elemento níquel en todas las muestras estándares, las concentraciones se encuentran dentro los límites permisibles, validándose de esta manera los resultados analíticos en cuanto a exactitud se refiere (ver en anexos tabla A1.9 y figura A1.9).

De todo lo anteriormente expuesto, en cuanto al parámetro exactitud analítica podemos afirmar que los resultados analíticos de la totalidad de las muestras quedan debidamente validados respecto a dicho parámetro de calidad.

7.1.3 Contaminación

El aseguramiento de la calidad para los resultados obtenidos, no podría ser garantizado si se evidencia la presencia de algún agente contaminante, es por eso que se emplearon muestras “blancos” para descartar la presencia de contaminaciones durante la etapa del análisis químico.

Los blancos empleados, estuvieron constituidos de arena cuarzosa, con concentraciones de metales traza conocidos, a continuación se presentan los resultados obtenidos en las muestras “blanco”, de los elementos La, Ce, Hf, Sc, Y, Fe, Bi, Cu, Pb, Zn, (ver tabla 9).



Fotografía 7. Muestras para el control de calidad, de izquierda a derecha: muestras duplicadas, muestras blanco y muestras estándares.

Tabla 9 Contenido de Metales Traza en Muestras "Blanco" para Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque.

Elemento	La	Ce	Hf	Sc	Y	Fe	Bi	Cu	Pb	Zn
Unidades	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm
Lím. Máx. Perm.*	1.250	2.454	0.02	0.463	0.654	1.435	0.049	35.78	22.84	18.416
Lím. de Detección	0.1	0.05	0.02	0.1	0.05	0.01	0.02	0.50	0.20	1
14f-150	0.3	0.45	0.02	0.3	0.21	0.41	0.02	10.10	3.00	3
14f-130	0.3	0.4	0.02	0.2	0.22	0.66	0.02	15.50	2.30	7
14f-110	0.4	0.59	0.02	0.2	0.2	0.79	0.02	13.90	2.50	5
14f-060	0.3	0.41	0.02	0.2	0.2	0.69	0.02	14.40	3.00	5
14f-040	0.3	0.43	0.02	0.1	0.18	0.44	0.03	11.30	2.50	5
14f-020	0.3	0.42	0.02	0.1	0.18	0.44	0.02	10.60	3.10	5
14e-150	0.3	0.44	0.02	0.1	0.2	0.94	0.02	16.60	2.70	5
14e-130	0.2	0.4	0.02	0.1	0.24	0.84	0.02	17.70	3.30	4
14e-110	0.2	0.29	0.02	0.1	0.17	0.8	0.02	14.70	3.00	3
14e-070	0.3	0.43	0.02	0.1	0.18	1.07	0.02	17.50	3.60	5
14e-040	0.3	0.51	0.02	0.2	0.22	0.47	0.02	11.80	2.40	5
14e-020	0.2	0.39	0.02	0.2	0.19	0.34	0.02	9.70	3.30	4
13e-040	0.3	0.4	0.02	0.1	0.17	0.46	0.02	13.50	3.00	7
13e-020	0.3	0.52	0.02	0.1	0.18	0.32	0.04	9.90	3.30	5

* Límites Máximos Permisibles determinados según el promedio + 2 desviaciones estándar.

Los resultados analíticos mostrados en la tabla 9 para muestras "blanco", se encuentran libres de contaminación, debido a que no exceden los límites permisibles para los siguientes elementos: La, Ce, Hf Sc, Y, Fe, Cu, Bi, Zn y Pb; tal como se pueden apreciar en las figuras A1.10 a A1.18 de los anexos.

Finalmente a través del control de la precisión, exactitud y contaminación, mediante muestras duplicadas, estándares y "blanco" respectivamente, se obtuvieron resultados aceptables, de esta manera se **validan todos los resultados analíticos del presente estudio.**

7.2 GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS LANTÁNIDOS

7.2.1 PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO

Luego que los datos de laboratorio han sido validados a través del control de calidad, éstos pasan a la fase del procesamiento estadístico.

El procesamiento estadístico se realizó con los datos correspondientes a la población conformada por las muestras en cuya granulometría predominan las tobas ácidas del Volcánico Huambos, de edad Neógena, las que son un total de 95 muestras, éstas pertenecen a un universo de 283 muestras en toda la cuenca. El universo esta conformado por 6 poblaciones estadísticas, según la predominancia litológica de la fracción granulométrica retenida en la malla 30 (0.75 μm), ver tabla 10.

Las variables objeto de estudio en esta investigación fueron las abundancias del lantano, cerio, terbio, iterbio, lutecio, escandio, hafnio; determinadas a través de los ensayos químicos por el método de ICP-MS, previo ataque químico de la muestra empleando agua regia. Dicho ensayo químico determinó concentraciones de 52 elementos químicos (incluidos los lantánidos). Además de las concentraciones de Au mediante espectroscopía de absorción atómica (AAS), previo ataque químico por vía sea (ensayo al fuego).

De todo lo expuesto, el tratamiento estadístico comprendió un exhaustivo análisis estadístico exploratorio, en la cual se trataron 53 variables, en la cual se determinó una gran afinidad entre el comportamiento geoquímico secundario del itrio y el de los elementos lantánidos, confirmando al itrio como parte de los elementos a describir (estadística descriptiva) y posteriormente a interpretar (estadística interpretativa multivariar).

Resulta de utilidad determinar los estadísticos descriptivos tales como la media, mediana, moda, desviación estándar o típica, varianza, valor máximo, valor mínimo, etc., para describir en forma resumida el conjunto de datos. Dentro del análisis exploratorio es importante emplear las pruebas de normalidad, en este caso se aplicó la prueba de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors.

Los diagramas de caja “box plot” muestran el centro de los datos (mediana) y la dispersión a su alrededor así como los valores atípicos y atípicos extremos (“outliers”).

Tabla 10 Poblaciones Estadísticas

Población	Descripción	Cantidad de muestras
1	Tobas ácidas del Neógeno	95
2	Andesitas y Dacitas del Paleógeno	115
3	Calizas del Cretáceo inferior	35
4	Areniscas y Cuarcitas del Jurásico – Cretáceo inferior	27
5	Lutitas del Jurásico – Cretáceo Inferior	7
6	Tobas ácidas y Andesitas del Jurásico	4

Las distribuciones de las concentraciones de los elementos lantánidos estudiados muestran un comportamiento normal, donde la media, mediana y la moda presentan valores similares entre sí. Los índices de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors, al 95% de confianza, muestran una significación mayor que 0.05 aceptándose así la hipótesis nula de una distribución normal (Dickinson, 2003). Los coeficientes de variación son menores que 0.5 confirmando esta hipótesis (ver tablas 11 a 17). Los diagramas de cajas “box plot”, histogramas de frecuencias absolutas, las curvas de distribución y los gráficos de normalidad; muestran tendencias en la distribución de las concentraciones del tipo normal (figuras 11 a 17).

A continuación se presentan los principales estadísticos descriptivos así como los gráficos de distribución y de normalidad de los elementos lantánidos estudiados.

a) Lantano

Tabla 11 Estadísticos Descriptivos – La

Media	14.558
Media recortada al 5%	14.465
Mediana	14
Moda	12.3
Varianza	20.179
Desviación típica	4.492
Mínimo	3.9
Máximo	27.9
Rango	24
Amplitud intercuartil	4.3
Asimetría	0.532
Curtosis	0.920
Prueba de normalidad*	0.137
Coefficiente de variación	0.42

* Índice de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors.

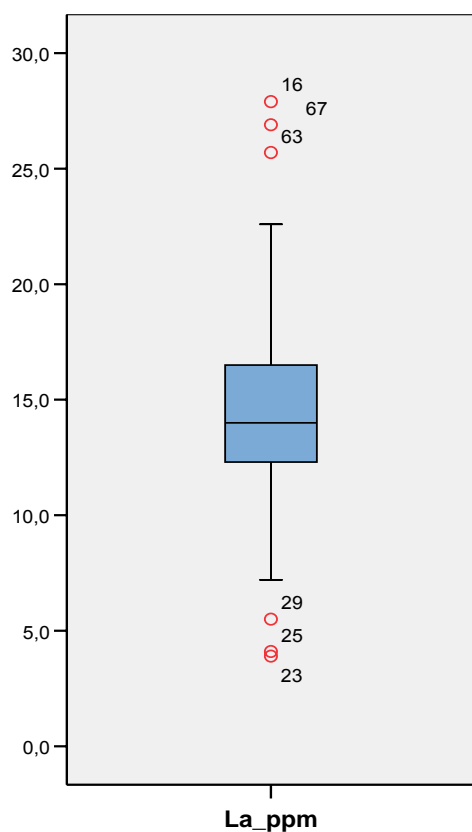


Figura 11a. Box plot (La)

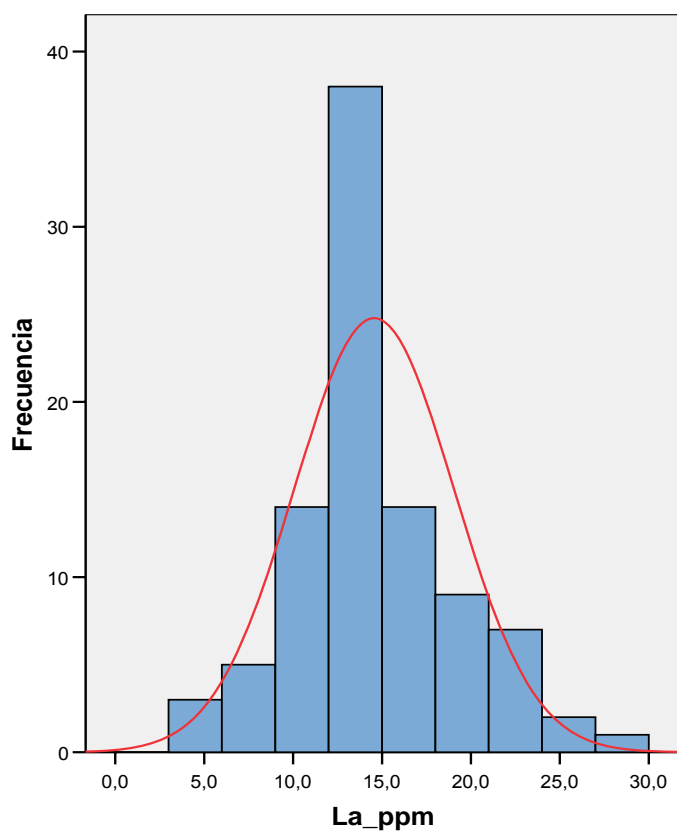


Figura 11b. Histograma de frecuencias (La)

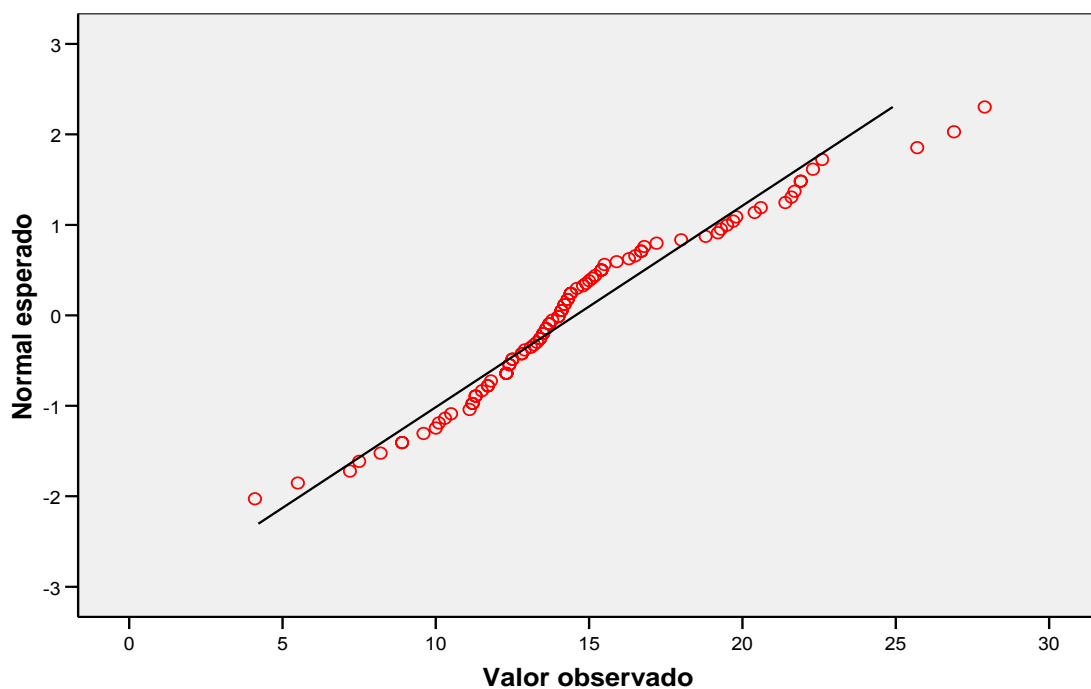


Figura 11c. Q-Q Normal (La)

b) Cerio

Tabla 12 Estadísticos Descriptivos - Ce

Media	26.033
Media recortada al 5%	25.865
Mediana	25.65
Moda	28.400
Varianza	53.587
Desviación típica	7.320
Mínimo	6.25
Máximo	52.3
Rango	46.05
Amplitud intercuartil	7.8
Asimetría	0.454
Curtosis	2.259
Prueba de normalidad*	0.107
Coefficiente de variación	0.30

* Índice de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors.

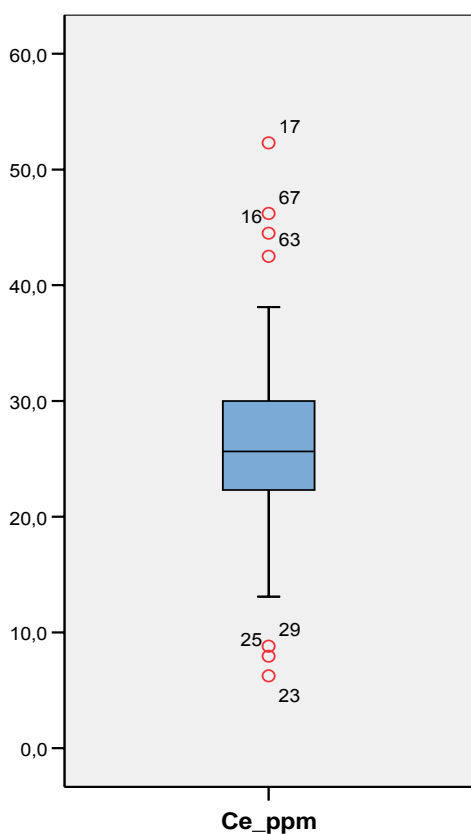


Figura 12a. Box plot (Ce)

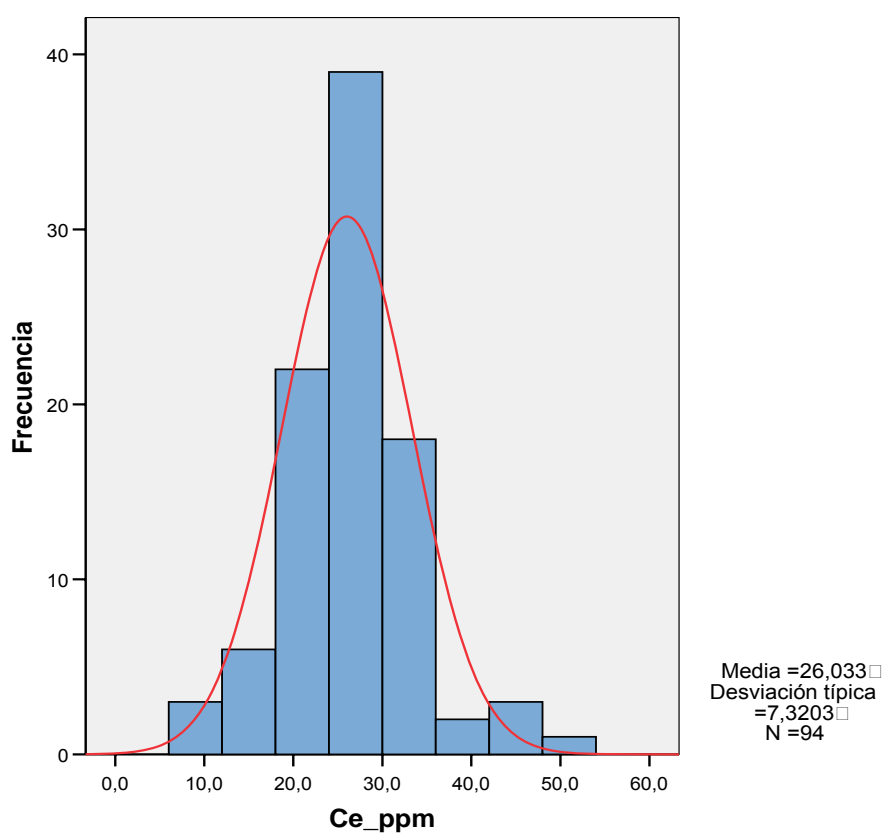


Figura 12b. Histograma de frecuencias (Ce)

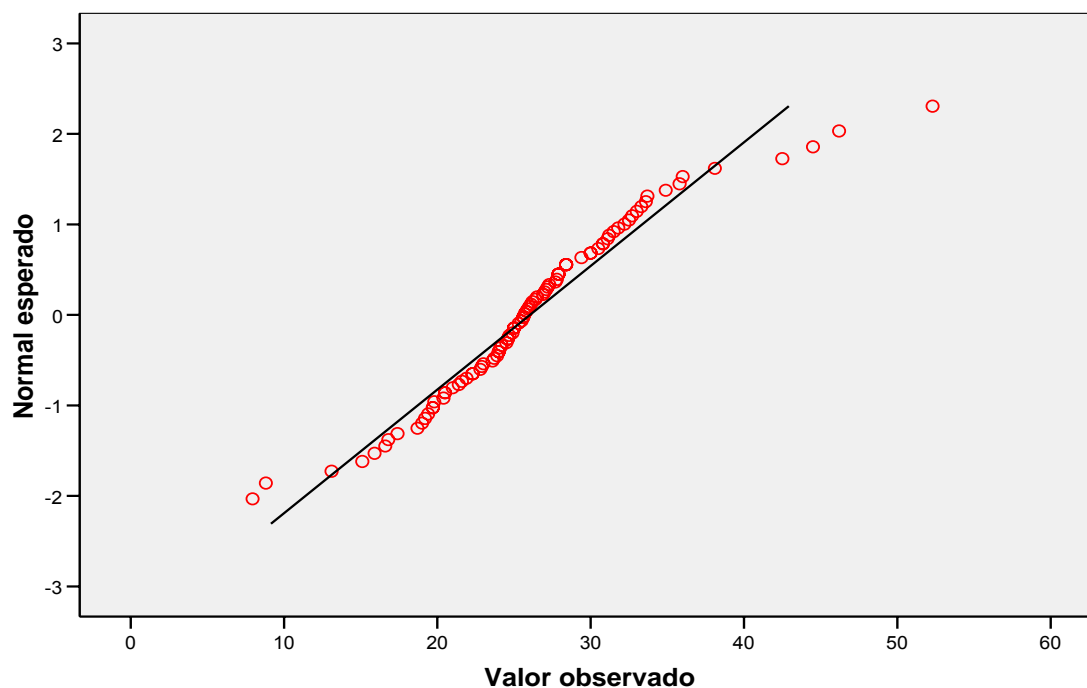


Figura 12c. Q-Q Normal (Ce)

c) Terbio

Tabla 13 Estadísticos Descriptivos - Tb

Media	0.398
Media recortada al 5%	0.400
Mediana	0.4
Moda	0.42
Varianza	0.004
Desviación típica	0.067
Mínimo	0.24
Máximo	0.54
Rango	0.3
Amplitud intercuartil	0.07
Asimetría	-0.436
Curtosis	0.076
Prueba de normalidad*	0.107
Coeficiente de variación	0.31

* Índice de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors.

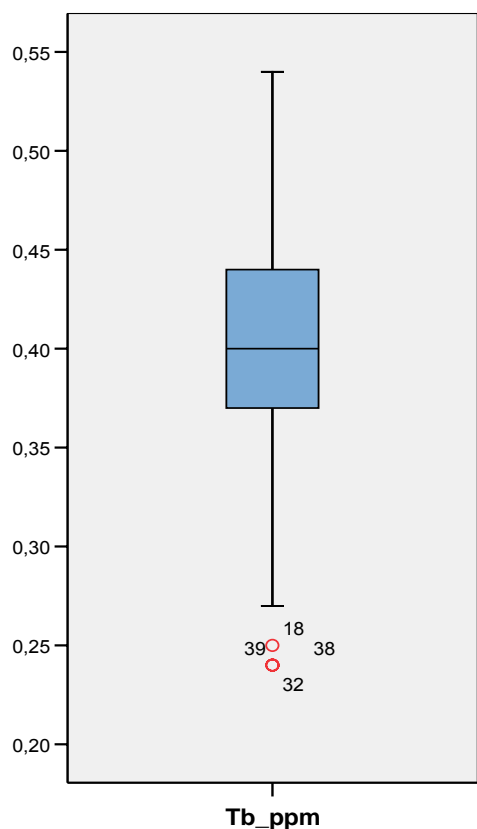


Figura 13a. Box plot (Tb)

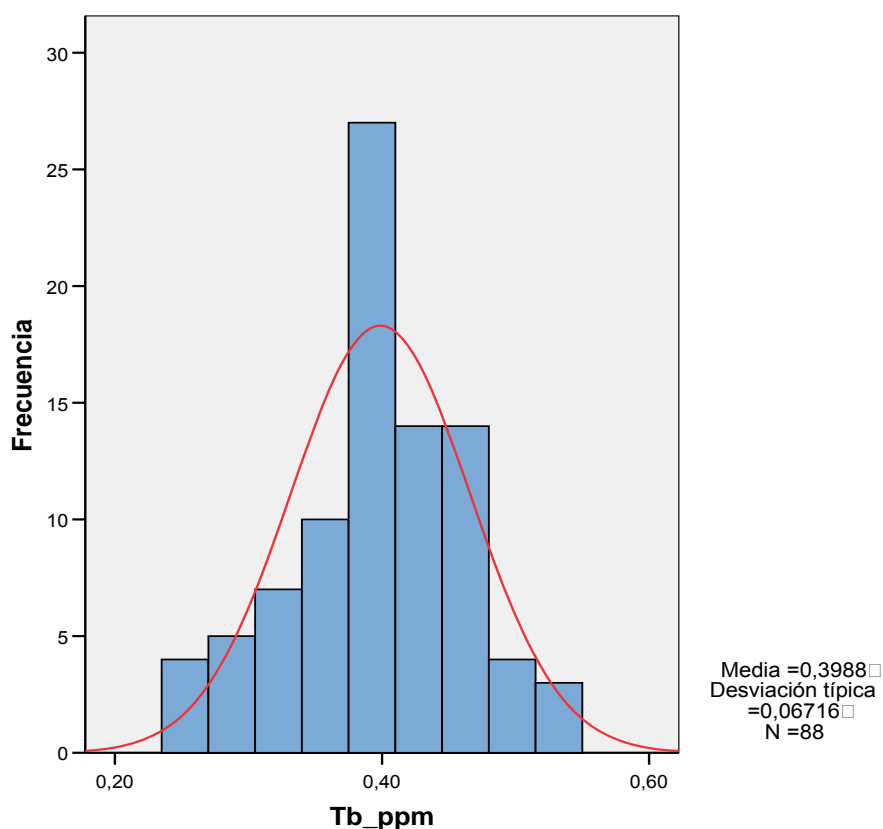


Figura 13b. Histograma de frecuencias (Tb)

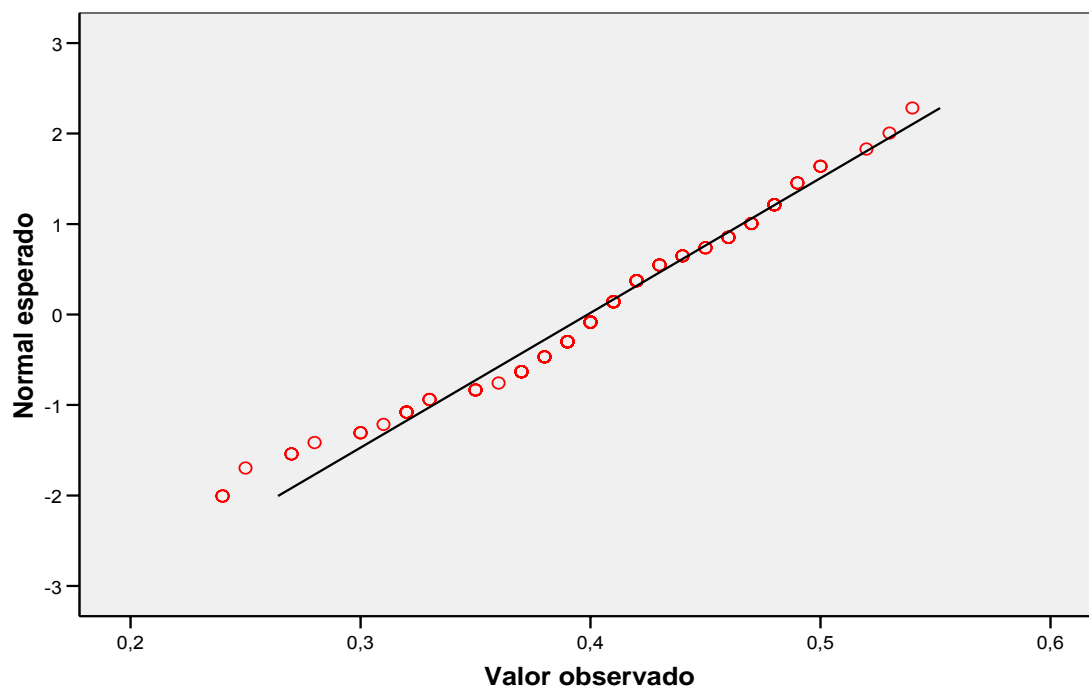


Figura 13c. Q-Q Normal (Tb)

d) Yterbio

Tabla 14 Estadísticos Descriptivos - Yb

Media	0.953
Media recortada al 5%	0.960
Mediana	1
Moda	1.1
Varianza	0.076
Desviación típica	0.275
Mínimo	0.1
Máximo	1.7
Rango	1.6
Amplitud intercuartil	0.3
Asimetría	-0.503
Curtosis	0.861
Prueba de normalidad*	0.136
Coefficiente de variación	0.33

* Índice de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors.

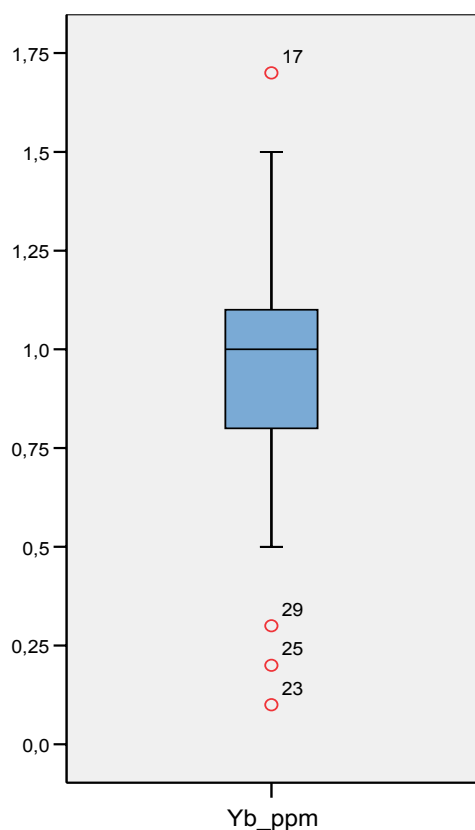


Figura 14a. Box plot (Yb)

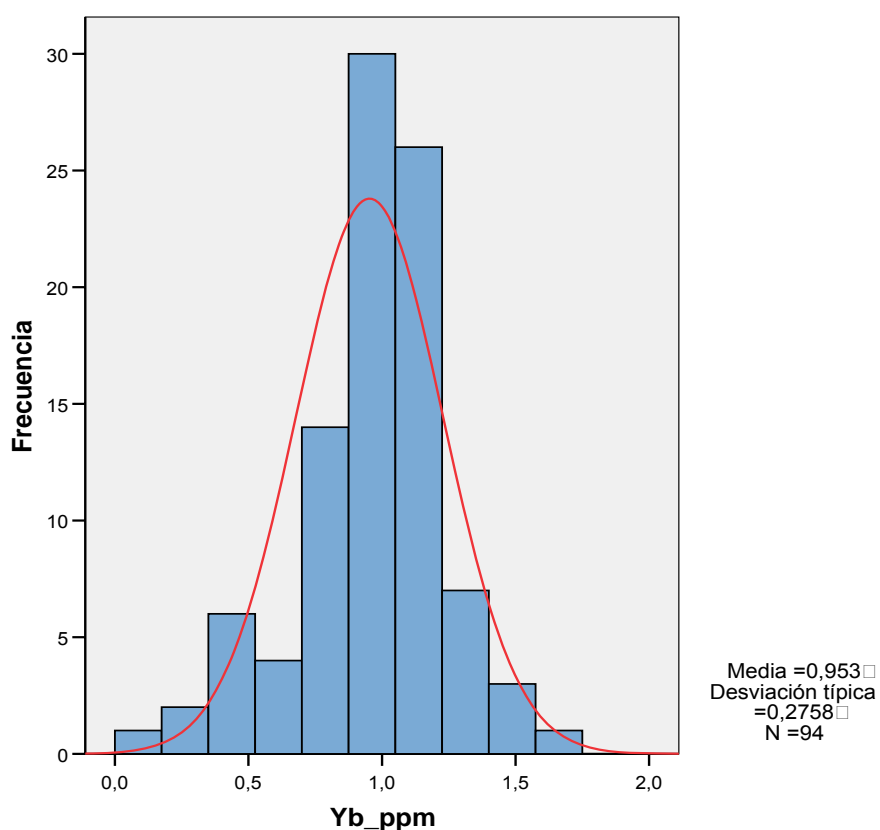


Figura 14b. Histograma de frecuencias (Yb)

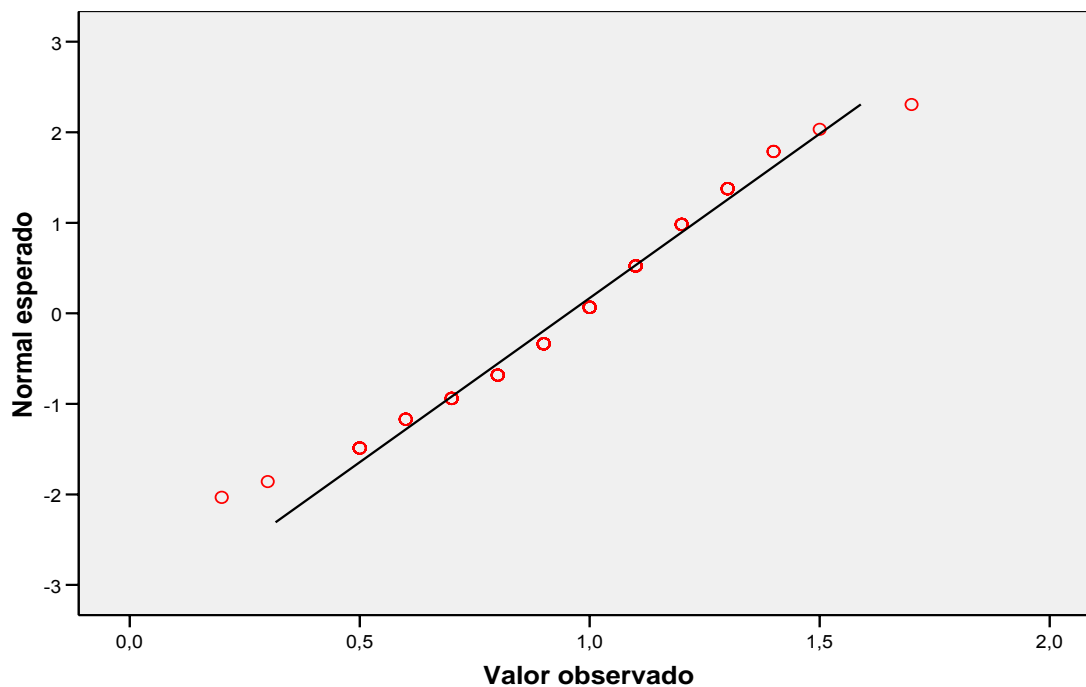


Figura 14c. Q-Q Normal (Yb)

e) Lutecio

Tabla 15 Estadísticos Descriptivos – Lu

Media	0.115
Media recortada al 5%	0.115
Mediana	0.12
Moda	0.12
Varianza	0.001
Desviación típica	0.036
Mínimo	0.01
Máximo	0.23
Rango	0.22
Amplitud intercuartil	0.0425
Asimetría	0.084
Curtosis	1.222
Prueba de normalidad*	0.104
Coefficiente de variación	0.37

* Índice de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors.

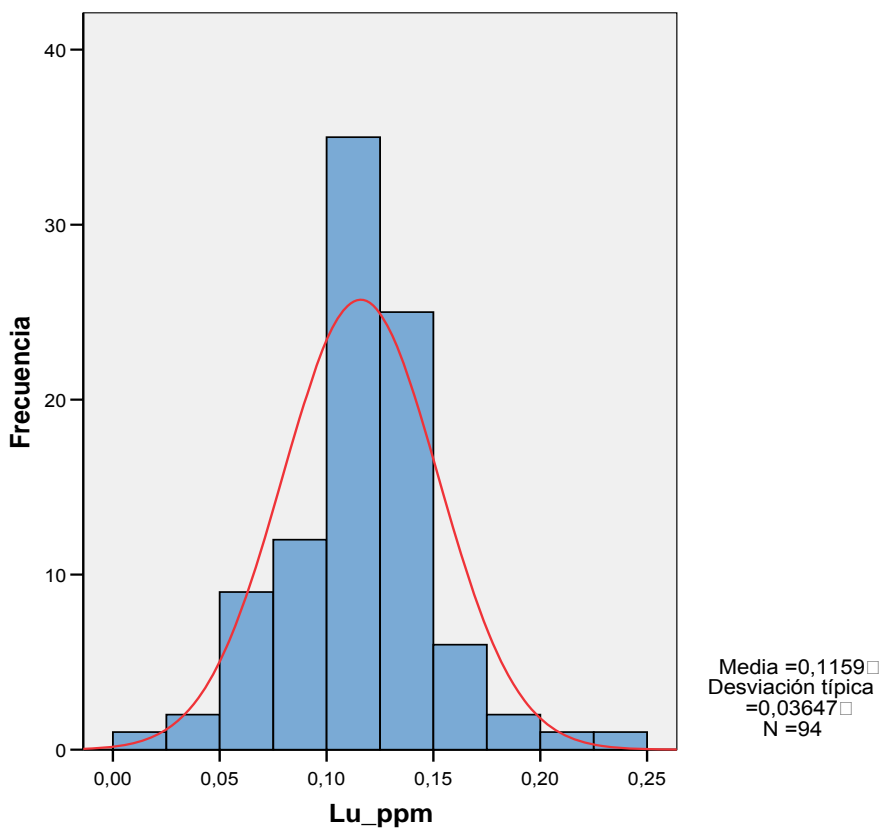
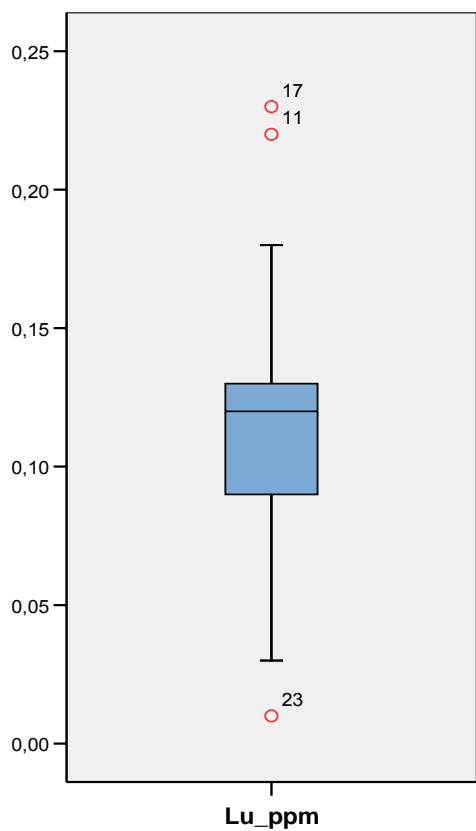


Figura 15a. Box plot (Lu)

Figura 15b. Histograma de Frecuencias (Lu)

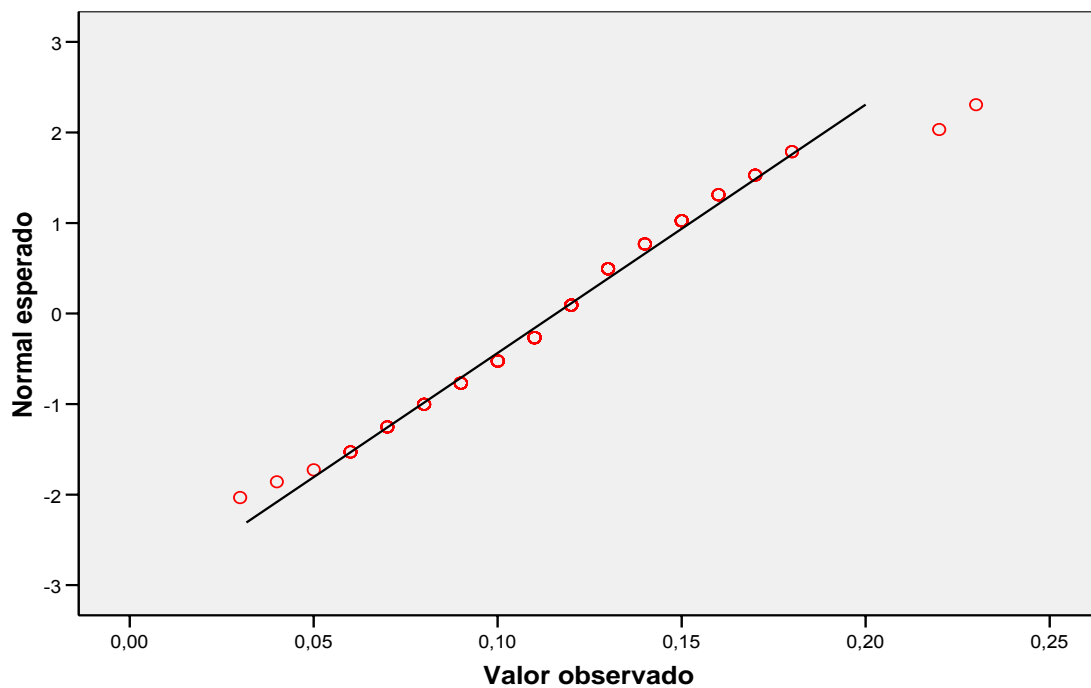


Figura 15c. Q-Q Normal (Lu)

f) Escandio

Tabla 16 Estadísticos Descriptivos - Sc

Media	5.826
Media recortada al 5%	5.720
Mediana	5.5
Moda	6.6
Varianza	5.500
Desviación típica	2.345
Mínimo	1.9
Máximo	13.8
Rango	11.9
Amplitud intercuartil	3.225
Asimetría	0.651
Curtosis	0.461
Prueba de normalidad*	0.079
Coefficiente de variación	0.48

*Índice de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors.

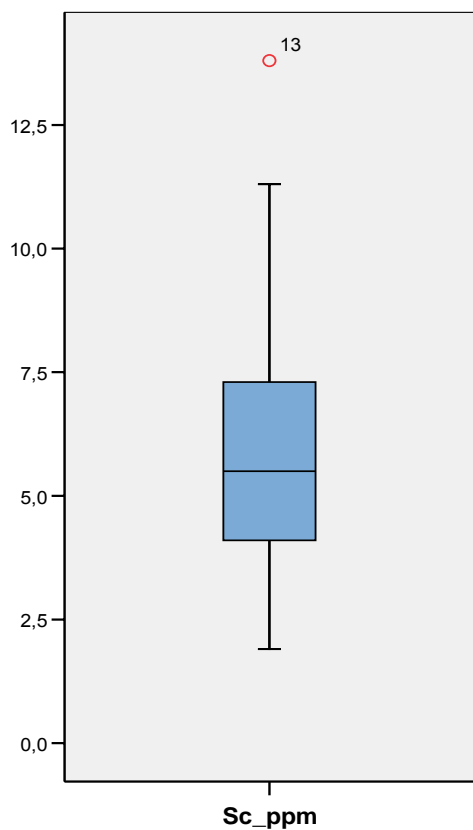


Figura 16a. Box plot (Sc)

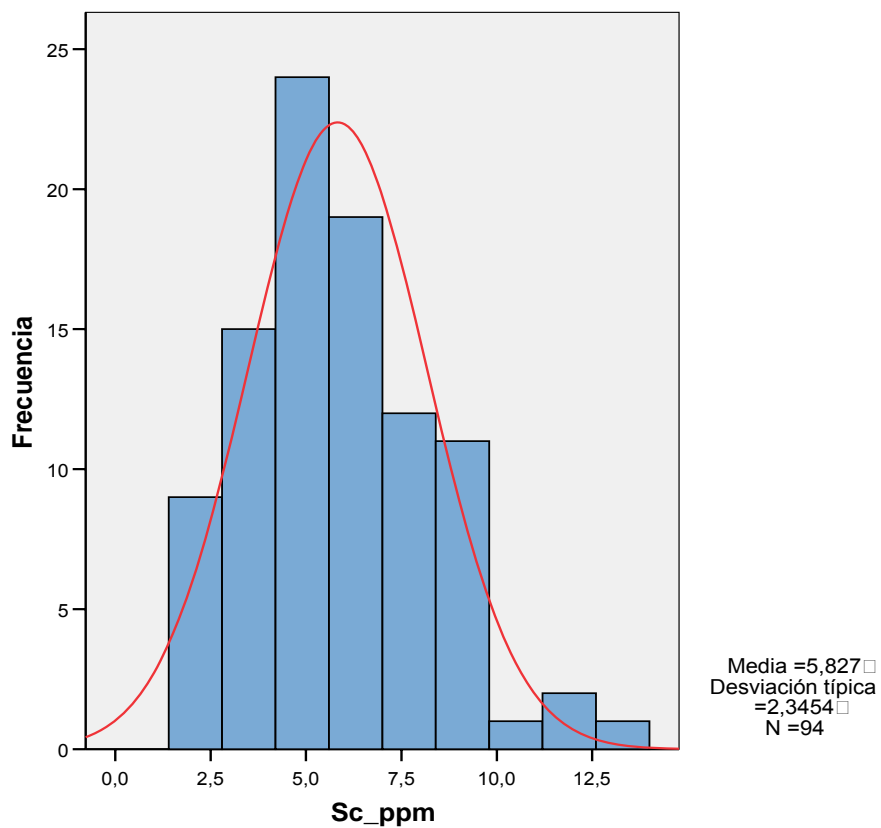


Figura 16b. Histograma de frecuencias (Sc)

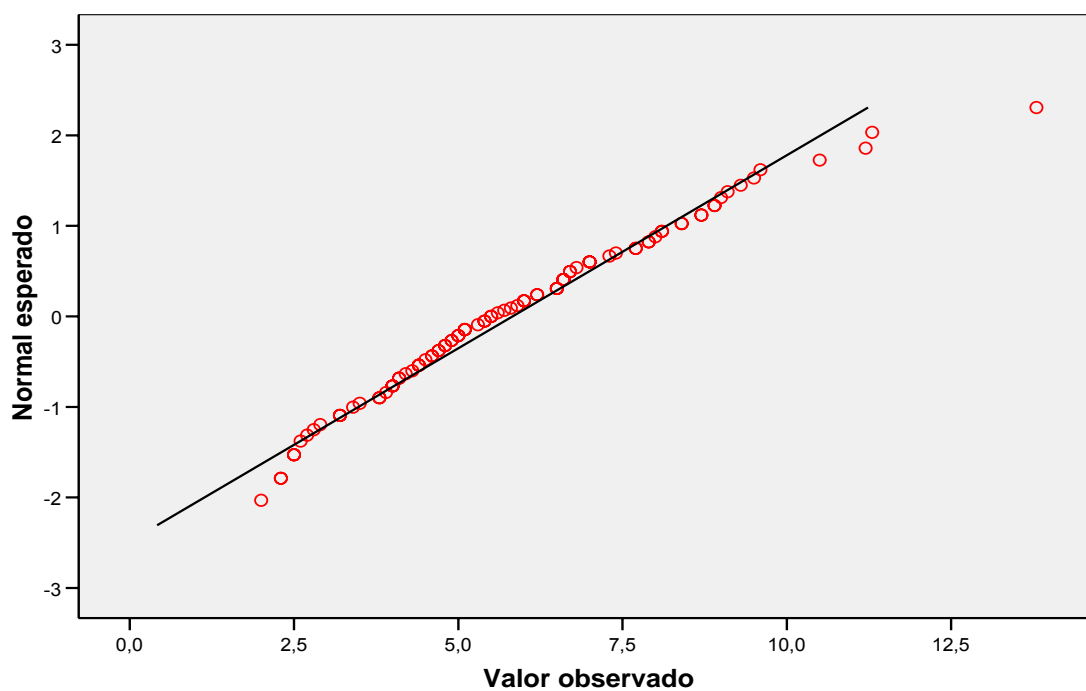


Figura 16c. Q-Q Normal (Sc)

g) Ytrio

Tabla 17 Estadísticos Descriptivos - Y

Media	11.236
Media recortada al 5%	11.251
Mediana	11.45
Moda	12.4
Varianza	8.004
Desviación típica	2.829
Mínimo	2.57
Máximo	20
Rango	17.43
Amplitud intercuartil	2.725
Asimetría	-0.212
Curtosis	1.455
Prueba de normalidad*	0.109
Coeficiente de variación	0.35

* Índice de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors.

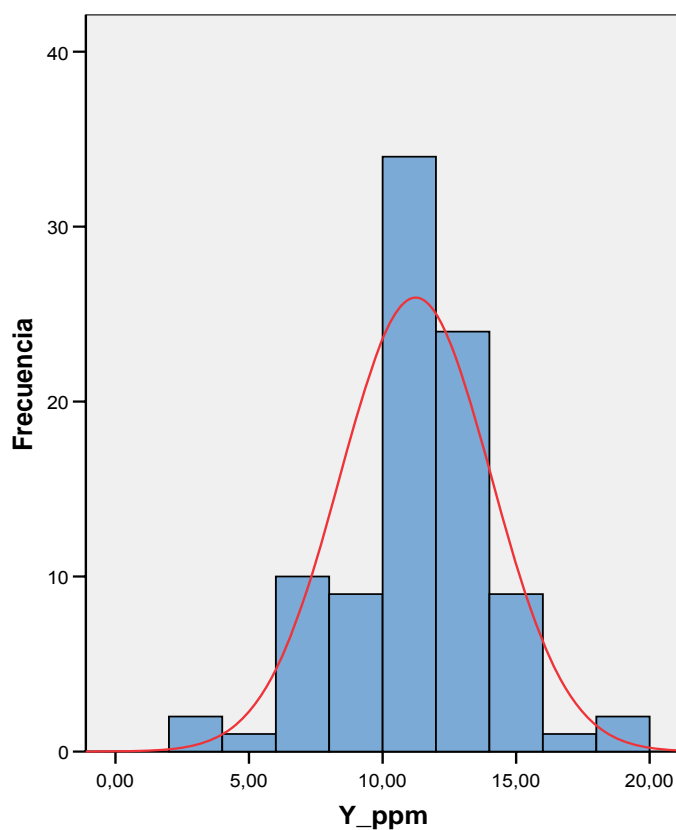
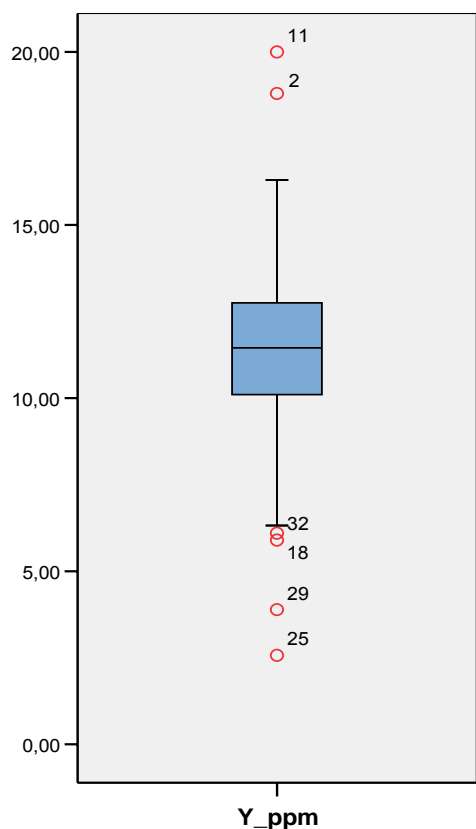


Figura 17a. Box plot (Y)

Figura 17b. Histograma de frecuencias (Y)

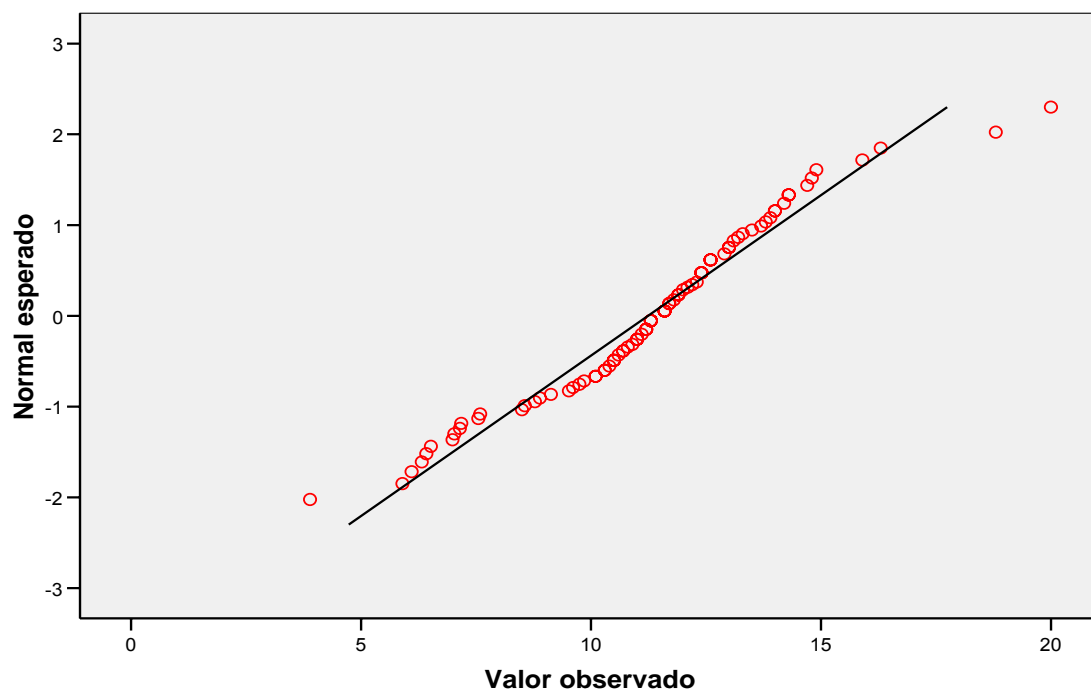


Figura 17c. Q-Q Normal (Y)

7.2.2 PARÁMETROS GEOQUÍMICOS

Aplicando la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors (donde se verifica la hipótesis de distribución normal de la variable y para un nivel de confianza del 95 %, si la significación es menor que 0.05, entonces se rechaza la hipótesis de la distribución normal) (Dickinson, 2003). A su vez con los histogramas de frecuencias absolutas y los gráficos tipo boxplot se evaluó el carácter de las distribuciones de los diferentes elementos, sin dejar de examinar los valores por debajo del límite de detección así como los valores atípicos y/o atípicos extremos, tomándose como criterio que los valores situados entre el final de los puntos extremos de los bigotes hasta una distancia igual a 3 veces la amplitud intercuartílica son considerados valores atípicos y aquellos más allá de estos puntos son llamados atípicos extremos, los cuales son retirados del tratamiento estadístico.

Todos los elementos mostraron una distribución normal, como se demuestra en el apartado anterior.

Una vez comprobada la normalidad de los elementos estudiados, mediante la estadística descriptiva se calculó la media geométrica y la desviación estándar para poder determinar los parámetros geoquímicos como el background que es igual a la media geométrica del conjunto de datos procesados. El cálculo del threshold, se obtiene sumando el valor del “background” más dos veces la desviación estándar (Sinclair, 1974).

Los valores que superen el threshold o umbral geoquímico corresponden al de las anomalías geoquímicas, donde además se deben incorporar los valores atípicos extremos (los que superen el bigote superior del diagrama boxplot).

En la tabla 18 se presentan los parámetros estadísticos-geoquímicos de cada elemento estudiado.

Tabla 18 Parámetros Estadísticos-Geoquímicos

Elementos	La	Ce	Tb	Yb	Lu	Sc	Y
N totales	95	95	95	95	95	95	95
N utilizadas	93	94	88	94	94	94	92
Valor mínimo (ppm)	3.9	6.3	0.07	0.1	0.01	1.9	1.22
Valor máximo (ppm)	52.7	56.7	1.04	2.5	0.35	22.8	30.8
Prueba de normalidad*	0.137	0.107	0.107	0.136	0.104	0.079	0.109
Coefficiente de variación	0.42	0.30	0.31	0.33	0.37	0.48	0.35
Background (ppm)	13.83	24.89	0.39	0.90	0.11	5.36	10.81
Desv. Estándar (ppm)	4.49	7.32	0.08	0.28	0.04	2.35	2.83
Threshold (ppm)	22.81	39.53	0.55	1.45	0.18	10.05	16.47
Carácter de la Distribución	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal

* Índice de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors.

7.2.3 ÍNDICES DE CORRELACIÓN BIVARIAL

Para evaluar las relaciones estadísticas existentes entre variables se calcularon los coeficientes de correlación a escala logarítmica, si bien es cierto las distribuciones de las concentraciones de los elementos lantánidos presentaron un carácter normal (sin tener la necesidad de transformarlos a una escala logarítmica), al momento de realizar el proceso de correlación tanto a escala natural como a escala logarítmica, en esta última los coeficientes de Pearson mostraron un mejor contraste estadístico, evidenciando mejor los grados de correspondencia entre las variables.

Se ha considerado como correlación fuerte a los valores superiores a 0,6 y débil para aquellos entre 0,3 y 0,6 (Plá, 2003).

Las correlaciones se realizaron utilizando el software SPSS versión 15. Se determinaron los coeficientes de Pearson de la totalidad de las variables disponibles (53 elementos incluidos los lantánidos), de los cuales se extrajo los índices de Pearson más importantes y significativos (Tabla 19).


Entre los elementos lantánidos, la correlación más alta se dio entre Yb-Lu con un coeficiente de 0.98, el 67.85% de los coeficientes de Pearson obtenidos entre los elementos lantánidos presentan una correlación superior a 0.60, lo que indica un alto grado de relación entre dichas variables (Plá, 2003) (ver tabla 19). Las correlaciones más elevadas entre elementos lantánidos y no lantánidos fueron entre Hf-Zr, Ce-Th y La-Rb con valores de 0.901, 0.746, 0.741 respectivamente (ver tabla 19).


Es necesario mencionar que se encontró correlaciones negativas interesantes como es el caso de Ce-Cu (-0.58) y La-Cu (-0.55), ver tabla 19. En las figuras 41a y 41b se muestra de manera gráfica las principales correlaciones entre elementos lantánidos así como lantánidos vs. no lantánidos.

Tabla 19 Índices de Correlación de Pearson

	Ln La	Ln Ce	Ln Tb	Ln Yb	Ln Lu	Ln Sc	Ln Y	Ln Hf	Ln Au	Ln Ba	Ln Cu	Ln P	Ln V	Ln Zr	Ln Ag	Ln As	Ln Be	Ln Bi	Ln Co	Ln Ga	Ln Mo	Ln Pb	Ln Rb	Ln Th
Ln La	1	0.945	0.756	0.627	0.641	0.201	0.686	0.276	-0.38	0.664	-0.55	-0.49	-0.06	0.343	-0.41	-0.27	0.526	-0.3	-0.04	0.032	-0.47	-0.2	0.741	0.715
Ln Ce	0.945	1	0.81	0.738	0.731	0.232	0.758	0.397	-0.45	0.62	-0.58	-0.46	0.021	0.487	-0.46	-0.39	0.665	-0.38	0.017	0.005	-0.49	-0.29	0.716	0.747
Ln Tb	0.756	0.81	1	0.931	0.935	0.573	0.975	0.485	-0.48	0.382	-0.54	-0.23	0.25	0.585	-0.44	-0.33	0.646	-0.48	0.311	0.201	-0.32	-0.39	0.534	0.549
Ln Yb	0.627	0.738	0.931	1	0.978	0.612	0.969	0.609	-0.47	0.293	-0.44	-0.17	0.337	0.727	-0.45	-0.44	0.705	-0.51	0.361	0.223	-0.35	-0.42	0.464	0.535
Ln Lu	0.641	0.731	0.935	0.978	1	0.63	0.965	0.614	-0.48	0.338	-0.44	-0.13	0.354	0.73	-0.47	-0.45	0.656	-0.52	0.374	0.255	-0.36	-0.44	0.463	0.521
Ln Sc	0.201	0.232	0.573	0.612	0.63	1	0.593	0.477	-0.23	0.108	-0	0.107	0.717	0.573	-0.22	-0.05	0.271	-0.32	0.708	0.687	-0.02	-0.24	0.152	0.073
Ln Y	0.686	0.758	0.975	0.969	0.965	0.593	1	0.537	-0.47	0.319	-0.52	-0.17	0.269	0.648	-0.45	-0.38	0.674	-0.5	0.323	0.2	-0.33	-0.41	0.508	0.538
Ln Hf	0.276	0.397	0.485	0.609	0.614	0.477	0.537	1	-0.39	0.189	-0.16	-0.17	0.304	0.901	-0.44	-0.43	0.39	-0.35	0.191	0.123	-0.33	-0.38	0.215	0.357
Ln Au	-0.38	-0.45	-0.48	-0.47	-0.48	-0.23	-0.47	-0.39	1	-0.19	0.498	0.224	-0.1	-0.4	0.679	0.437	-0.36	0.503	-0.09	0.071	0.435	0.487	-0.22	-0.37
Ln Ba	0.664	0.62	0.382	0.293	0.338	0.108	0.319	0.189	-0.19	1	-0.27	-0.38	0.017	0.192	-0.28	-0.12	0.242	-0.01	0.027	0.023	-0.32	-0.1	0.621	0.511
Ln Cu	-0.55	-0.58	-0.54	-0.44	-0.44	-0	-0.52	-0.16	0.498	-0.27	1	0.436	0.304	-0.24	0.571	0.396	-0.39	0.505	0.3	0.301	0.473	0.481	-0.43	-0.52
Ln P	-0.49	-0.46	-0.23	-0.17	-0.13	0.107	-0.17	-0.17	0.224	-0.38	0.436	1	0.318	-0.13	0.206	0.08	-0.25	0.059	0.335	0.169	0.368	-0.05	-0.42	-0.52
Ln V	-0.06	0.021	0.25	0.337	0.354	0.717	0.269	0.304	-0.1	0.017	0.304	0.318	1	0.401	-0.05	-0.06	0.192	-0.16	0.82	0.684	0.069	-0.18	-0.17	-0.21
Ln Zr	0.343	0.487	0.585	0.727	0.73	0.573	0.648	0.901	-0.4	0.192	-0.24	-0.13	0.401	1	-0.49	-0.53	0.456	-0.51	0.214	0.194	-0.4	-0.5	0.286	0.409
Ln Ag	-0.41	-0.46	-0.44	-0.45	-0.47	-0.22	-0.45	-0.44	0.679	-0.28	0.571	0.206	-0.05	-0.49	1	0.588	-0.33	0.694	0.001	0.111	0.569	0.749	-0.26	-0.41
Ln As	-0.27	-0.39	-0.33	-0.44	-0.45	-0.05	-0.38	-0.43	0.437	-0.12	0.396	0.08	-0.06	-0.53	0.588	1	-0.36	0.642	0.093	0.102	0.655	0.703	-0.1	-0.32
Ln Be	0.526	0.665	0.646	0.705	0.656	0.271	0.674	0.39	-0.36	0.242	-0.39	-0.25	0.192	0.456	-0.33	-0.36	1	-0.38	0.265	0.049	-0.28	-0.25	0.321	0.407
Ln Bi	-0.3	-0.38	-0.48	-0.51	-0.52	-0.32	-0.5	-0.35	0.503	-0.01	0.505	0.059	-0.16	-0.51	0.694	0.642	-0.38	1	-0.09	-0.09	0.472	0.765	-0.1	-0.2
Ln Co	-0.04	0.017	0.311	0.361	0.374	0.708	0.323	0.191	-0.09	0.027	0.3	0.335	0.82	0.214	0.001	0.093	0.265	-0.09	1	0.624	0.132	-0.05	-0.2	-0.29
Ln Ga	0.032	0.005	0.201	0.223	0.255	0.687	0.2	0.123	0.071	0.023	0.301	0.169	0.684	0.194	0.111	0.102	0.049	-0.09	0.624	1	0.075	0.03	-0.06	-0.29
Ln Mo	-0.47	-0.49	-0.32	-0.35	-0.36	-0.02	-0.33	-0.33	0.435	-0.32	0.473	0.368	0.069	-0.4	0.569	0.655	-0.28	0.472	0.132	0.075	1	0.514	-0.26	-0.33
Ln Pb	-0.2	-0.29	-0.39	-0.42	-0.44	-0.24	-0.41	-0.38	0.487	-0.1	0.481	-0.05	-0.18	-0.5	0.749	0.703	-0.25	0.765	-0.05	0.03	0.514	1	-0.08	-0.21
Ln Rb	0.741	0.716	0.534	0.464	0.463	0.152	0.508	0.215	-0.22	0.621	-0.43	-0.42	-0.17	0.286	-0.26	-0.1	0.321	-0.1	-0.2	-0.06	-0.26	-0.08	1	0.8
Ln Th	0.715	0.747	0.549	0.535	0.521	0.073	0.538	0.357	-0.37	0.511	-0.52	-0.52	-0.21	0.409	-0.41	-0.32	0.407	-0.2	-0.29	-0.29	-0.33	-0.21	0.8	1


 Elementos Lantánidos

 Elementos No Lantánidos
(Lantánido)

 Correlaciones Lineales mayores a 0.60 (Entre elementos Lantánidos)

 Correlaciones Lineales mayores a 0.60 (Lantánido vs No Lantánido)

 Correlaciones Lineales negativas máximas (Lantánido vs. No

 Correlaciones Lineales mayores a 0.60 (entre elementos no Lantánido)

7.2.4 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)

La aplicación de técnicas analíticas multielementales para la caracterización geoquímica de muestras, sumada a la determinación de otros parámetros, genera una gran cantidad de datos que conforman una matriz de n muestras por p variables. La caracterización multielemental de las muestras puede utilizarse para diferentes propósitos tales como formar grupos estadísticamente significativos de muestras similares, asignar muestras a grupos ya establecidos o en general, encontrar una estructura o vínculo latente en los datos. El objetivo específico de un análisis de componentes principales, es explicar la mayor parte de la variabilidad total observada en un conjunto de variables con el menor número de componentes posibles (Uriel, 1995). Cualquiera que sea el propósito del estudio, habitualmente es imposible investigar visualmente las relaciones entre las muestras y/o variables, siendo necesaria la aplicación de técnicas que permitan el manejo y evaluación de los datos.

La determinación de coeficientes de correlación constituye el primer paso de la aplicación del análisis multivariado. Cada muestra puede representarse como un punto en el espacio determinado por las variables medidas, buscándose hallar algún tipo de relación oculta, que por la complejidad de la matriz de datos no es posible observar a simple vista.

Como se tiene un conjunto de datos grande, existe el interés en encontrar “grupos naturales” o la existencia de patrones comunes de agrupamiento dentro de los mismos. Para realizar un análisis de componentes principales se debe partir de un conjunto de variables altamente relacionadas entre sí, tratando de buscar reducir el número de variables que describen el problema sin perder la información original, esto a través de un número mínimo de componentes que pueda explicar la máxima varianza de los datos. La varianza total puede dividirse en tres partes diferenciadas: varianza común, varianza específica y error. A partir de las correlaciones observadas entre las variables originales, se definen unas dimensiones adyacentes (los valores teóricos), que son los componentes principales, obtenidos como combinaciones lineales de las variables originales.

El proceso matemático por el que se desarrolla la elección de las componentes principales de una muestra, se realiza a partir de una matriz de correlaciones, en la que mediante la aplicación del análisis factorial correspondiente, se extrae otra que se denomina factorial (Harman, 1976).

7.2.4.1 Definición de la matriz de correlaciones

Se parte de la matriz de variables originales X que recoge información inicial de la muestra de n casos (la que en nuestro estudio serían los puntos de muestreo) sobre p variables (concentraciones químicas de los elementos a estudiar):

$$X = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{np} \end{pmatrix}$$

La matriz de varianzas y covarianzas muestrales V queda definida como:

$$V = \begin{pmatrix} S^2_1 & S_{12} & \dots & S_{1p} \\ S_{21} & S^2_2 & \dots & S_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{p1} & S_{p2} & \dots & S^2_p \end{pmatrix}$$

Cuya diagonal principal está compuesta de varianzas iguales a la unidad cuando las variables están tipificadas.

Asimismo, a partir de X se puede calcular la matriz de correlaciones muestral R . Esta matriz informa sobre la concomitancia en la variación observada entre pares de variables que se tratara de explicar con el menor número de factores (variables latentes). Las variables que muestran una muy baja correlación son candidatas a ser eliminadas del análisis.

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{p1} & r_{p2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

7.2.4.2 Obtención de las componentes principales

Los componentes principales son una nueva clase de variables independientes entre sí (ortogonales) y funciones lineales de las variables originales, con la propiedad de tener varianza máxima. Estos componentes están jerarquizados en base a la información que incorporan, medida por el porcentaje de varianza total explicada de la matriz de datos originales. La obtención de los componentes es la que sigue (Uriel, 1995).

La primera componente principal Z_{1i} se expresa como combinación lineal de las p variables originales, donde u_{1j} son las ponderaciones:

$$\begin{pmatrix} Z_{11} \\ Z_{12} \\ \dots \\ Z_{1n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{21} & \dots & X_{p1} \\ X_{12} & X_{22} & \dots & X_{p2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{pn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{11} \\ u_{12} \\ \dots \\ u_{1p} \end{pmatrix}$$

De forma matricial resumida, el componente z_1 será:

$$z_1 = Xu_1$$

La primera componente se obtiene maximizando su varianza $Var(z_1)$, sujeta a la restricción de que la suma de sus ponderaciones (u_{1j}) al cuadrado sea igual a la unidad:

$$\sum_{j=1}^p u_{1j}^2 = u_1' u_1 = 1$$

La varianza del primer componente, considerando que su media es cero, viene dada por:

$$Var(z_1) = \frac{\sum_{i=1}^n Z_{1i}^2}{n} = \frac{1}{n} z_1' z_1 = \frac{1}{n} u_1' X' X u_1 = u_1' \left[\frac{1}{n} X' X \right] u_1$$

Si las variables están tipificadas, $[n \times n]$ la matriz de correlación R . Si las variables están expresadas en desviaciones respecto a la media, esa expresión es la matriz de covarianzas muestral V . Siguiendo la descripción sobre la base de la matriz V , la expresión de la varianza es:

$$Var(z_1) = u_1' V u_1$$

Para maximizar esa función sujeta a la restricción $\sum_{j=1}^p u_{1j}^2 = u_1' u_1 = 1$, se conforma el langrangiano a maximizar:

$$L = u_1' V u_1 - \lambda (u_1' u_1 - 1)$$

Derivando respecto a u_1 e igualando a cero:

$$\frac{\partial L}{\partial u_1} = 2V u_1 - 2\lambda u_1 = 0 ; (V - \lambda I) u_1 = 0$$

Al resolver esta expresión se obtienen raíces características o autovalores ("eigenvalues"). El vector u_1 es el vector característico ("eigenvector") correspondiente a la raíz característica mayor (λ_1) de la matriz V .

El resto de componentes se obtienen de forma análoga. Para el siguiente componente z_2 se impone además de $u_2' u_2 = 1$, la condición de que no esté correlacionado con el anterior $u_2' u_1 = 0$ y así para todos los p componentes. Para el componente genérico Z_h :

$$u_h' u_h = 1$$

$$u_h' u_1 = u_h' u_2 = \dots = u_h' u_{h-1} = 0$$

Es decir, que no estén correlacionados los componentes.

El vector de ponderaciones u_h para el componente Z_h está asociado a la raíz característica λ_h , una vez ordenadas éstas de mayor a menor.

Para considerar la proporción de la varianza total explicada por cada componente, es necesario determinar la varianza de las componentes. Dada la condición impuesta de que $u_h' u_h = 1$, la varianza del componente Z_h es precisamente la raíz característica λ_h a la que va asociada:

$$Var(z_h) = u_h' V u_h = \lambda_h$$

La variabilidad total observada en las variables originales puede definirse como la suma de sus varianzas, las cuales aparecen en la diagonal principal de la matriz V . La traza, suma de los elementos de la diagonal principal, de la matriz V es precisamente esa varianza total:

$$Traza(V) = \sum_{h=1}^p \lambda_h$$

Por consiguiente, el componente Z_h explica una proporción P_h de la variación total en los datos originales igual a:

$$P_h = \frac{\lambda_h}{\text{Traza}(V)}$$

Resulta habitual determinar las covarianzas y las correlaciones entre las variables originales y los componentes principales. La covarianza entre la variable X_j y la componente Z_h es.

$$\text{Cov}(X_j, Z_h) = \lambda_h u_{hj}$$

La correlación entre la variable tipificada X_j y la componente Z_h es:

$$r_{jh} = \frac{\lambda_h u_{hj}}{\sqrt{\text{var}(X_j)} \sqrt{\lambda_h}} = u_{hj} \sqrt{\lambda_h}$$

Este coeficiente es el que conforma la denominada matriz factorial, de componentes o de cargas factoriales.

Resumiendo, los componentes principales son extraídos de modo que el primer componente, una combinación lineal de las variables originales, explique la mayoría de la varianza total de los datos. El segundo componente, explicará la mayor parte de la variación total restante que no haya sido explicada por el primero y así sucesivamente hasta que el número de componentes sea igual al de las variables originales.

7.2.4.3 Selección del número de componentes principales

Sobre la base de la información recogida en las raíces características (autovalores) hay diversos criterios para decidir el número razonable de factores que permita definir la estructura correcta de los datos y posibilite su posterior interpretación. Los criterios más importantes son:

- a) Criterio de la media aritmética o de la raíz latente (Kaiser, 1958), se basa en la selección del número de factores cuya raíz característica (auto valor) λ_j supere el valor medio de las raíces características.

En el caso de las variables tipificadas (Donde $\sum_{j=1}^p \lambda_j = p$) este criterio se traduce en seleccionar las componentes cuya raíz característica sea mayor que uno.

- b) Contraste de caída (Cattell, 1966), este contraste parte de la representación gráfica de las raíces características por cada componente en orden decreciente (gráfico de sedimentación). Se escogen las componentes hasta el punto en que la curva descendente comience a ser una línea horizontal (zona de sedimentación), lo que indica que a partir de ese punto la proporción de varianza explicada no compartida es demasiado grande.
- c) Porcentaje de varianza explicada, el criterio de la varianza explicada radica precisamente en acumular el porcentaje de varianza explicada por las componentes o factores hasta llegar a un nivel mínimo (en investigaciones sociales se suele ser en torno al 60-70%), en relación con el número de variables y observaciones. Otra alternativa consiste en escoger suficientes componentes para explicar o discriminar entre subconjuntos muestrales que a priori se puedan delimitar.

Habitualmente, es posible describir el 70% o más de la varianza original con un número limitado de componentes y una mínima pérdida de la información (Plá, 2003). Según García et al. (2003) el número de componentes que se retiene se determina en base a los “autovalores” de la matriz de correlación, aplicando reglas como el Criterio de Kaiser. Aunque el criterio más utilizado es el de observar el porcentaje de varianza total explicada por cada componente o factor, y cuando éste llega a un porcentaje acumulado considerado alto, normalmente cerca del ochenta por ciento, significa que el número de factores es suficiente.

Una vez extraídos los componentes, ésta solución matemática tiene que ser transformada en una con significado físico, lo que facilita la interpretación. Una de las transformaciones ortogonales más utilizada es la del Varimax (Kaiser, 1958), es una técnica iterativa que supone girar en el origen los ejes de referencia de los factores hasta alcanzar una rotación de 90 grados.

Identificadas las variables con mayor carga o influencia sobre cada componente se puede proceder a etiquetar o nombrar las componentes. Mediante este proceso se maximiza la diferencia de varianzas entre las variables, conservando la independencia estadística de los factores y sirve de nexo entre ellos y su significado físico.

7.2.4.4 Resultados del análisis de componentes principales

Antes de la realización del análisis de componentes principales se procedió a transformar los datos aritméticos a una escala logarítmica, puesto que la mayoría de las variables estudiadas presentan un comportamiento Log-normal, incluso las variables correspondientes a las “tierras raras” que tienen un comportamiento normal al ser transformadas no presentan ninguna distorsión en su distribución, en cuanto a las distribuciones erráticas como el caso del oro, éstas muestran una ligera mejoría en su distribución a escala logarítmica.

Se descartaron las variables correspondientes a los elementos mayores (Al, B, Ca, Fe, K, Mg, Na, S y Ti), así como las variables cuyos valores por debajo del límite de detección superan el 5% del total de observaciones (Plá, 2003), como fue el caso del Ge, Se, Ta y Te.

El análisis de componentes principales se realizó con 40 variables de un total de 53. Empleando el software SPSS versión 15, se procedió a la determinación de la matriz de correlación muestral y poblacional (tablas 20 y 21 respectivamente).

Para saber si los coeficientes expresados en las matrices de correlación muestral y poblacional son significativos, se realiza un contraste de significancia individual y después un contraste de significancia conjunta. El contraste de significancia individual sería:

Hipótesis nula: Ausencia de correlación $\Rightarrow H_0 : r_{ij} = 0$

Hipótesis alternativa: Existe autocorrelación positiva $\Rightarrow H_1 : r_{ij} > 0$ ó

Existe autocorrelación negativa $\Rightarrow H_1 : r_{ij} < 0$

De la matriz de correlaciones muestral (tabla 20), podemos observar que existen correlaciones positivas como negativas, destacando los coeficientes entre La-Ce, Tb-Ce, Tb-Lu, Yb-Lu, Yb-Tb, Yb-Y, Y-Lu, Y-Tb, que son superiores a 0.8, entre las correlaciones negativas, éstas alcanzan un valor máximo de -0.58, correspondiente a Ce-Cu.

El contraste de significancia conjunta sería:

Hipótesis nula: Ausencia de correlación $\Rightarrow H_0 : |R|=1$

Hipótesis alternativa: Existe autocorrelación $\Rightarrow H_0 : |R| \neq 1$

Tabla 20 Matriz de Correlación Muestral

Mn	Ln_P	Ln_Sr	Ln_V	Ln_Zn	Ln_Zr	Ln_Ag	Ln_As	Ln_Be	Ln_Bi	Ln_Cd	Ln_Ce	Ln_Co	Ln_Cs	Ln_Ga	Ln_Hf	Ln_Hg	Ln_In	Ln_La	Ln_Lu	Ln_Mo	Ln_Nb	Ln_Ni	Ln_Pb	Ln_Rb	Ln_Sb	Ln_Sc	Ln_Sn	Ln_Tb	Ln_Th	Ln_Tl	Ln_U	Ln_W	Ln_Y	Ln_Yb
032	0.224	-0.327	-0.098	0.348	-0.404	0.679	0.437	-0.362	0.503	0.267	-0.447	-0.087	0.098	0.071	-0.393	0.270	0.345	-0.385	-0.485	0.435	0.085	0.042	0.487	-0.221	0.467	-0.232	0.136	-0.483	-0.365	0.345	-0.226	0.033	-0.468	-0.466
255	-0.384	0.356	0.017	-0.131	0.192	-0.284	-0.124	0.242	-0.005	-0.325	0.620	0.027	0.158	0.023	0.189	0.047	-0.125	0.664	0.338	-0.322	-0.249	-0.088	-0.096	0.621	-0.301	0.108	0.094	0.382	0.511	0.192	0.164	-0.266	0.319	0.293
182	0.261	0.090	0.647	0.265	0.186	0.142	0.043	0.094	0.099	0.094	0.042	0.446	0.146	0.265	0.069	0.124	0.129	-0.021	0.159	0.168	0.197	0.786	0.028	-0.015	0.122	0.329	0.441	0.123	0.001	-0.071	0.054	0.033	0.108	0.150
061	0.436	-0.182	0.304	0.555	-0.237	0.571	0.396	-0.391	0.505	0.310	-0.579	0.300	-0.003	0.301	-0.156	0.230	0.547	-0.550	-0.438	0.473	0.028	0.369	0.481	-0.429	0.425	-0.005	0.197	-0.536	-0.522	0.200	-0.379	0.075	-0.520	-0.438
326	0.038	0.157	0.390	0.226	0.369	-0.088	0.121	0.537	-0.256	0.354	0.274	0.421	0.431	0.251	0.238	-0.092	0.033	0.187	0.448	0.076	0.229	0.357	-0.069	0.188	0.158	0.520	-0.042	0.480	0.121	-0.074	0.307	0.202	0.512	0.527
000	0.006	0.014	0.505	0.460	0.193	-0.014	0.133	0.339	-0.093	0.243	0.328	0.708	0.204	0.553	0.148	0.089	0.334	0.332	0.428	-0.017	0.158	0.155	0.090	0.080	0.082	0.574	0.151	0.414	-0.035	0.032	-0.027	0.061	0.408	0.416
006	1.000	0.183	0.318	0.354	-0.125	0.206	0.080	-0.248	0.059	0.403	-0.457	0.335	-0.237	0.169	-0.171	0.034	0.218	-0.489	-0.134	0.368	0.086	0.480	-0.053	-0.424	0.108	0.107	-0.068	-0.235	-0.516	-0.056	-0.312	0.063	-0.171	-0.167
014	0.183	1.000	0.164	-0.155	0.541	-0.401	-0.473	0.314	-0.275	-0.058	0.319	0.127	-0.265	-0.162	0.545	-0.409	-0.310	0.228	0.457	-0.200	-0.237	0.346	-0.461	0.241	-0.477	0.150	0.126	0.353	0.339	-0.354	0.242	-0.069	0.421	0.447
005	0.318	0.164	1.000	0.341	0.401	-0.050	-0.057	0.192	-0.161	0.101	0.021	0.820	-0.022	0.684	0.304	0.010	0.291	-0.057	0.354	0.069	0.265	0.542	-0.183	-0.174	-0.065	0.717	0.252	0.250	-0.205	-0.254	-0.044	0.031	0.269	0.337
160	0.354	-0.155	0.341	1.000	-0.231	0.574	0.508	0.059	0.428	0.739	-0.262	0.517	0.242	0.391	-0.201	0.295	0.663	-0.212	-0.037	0.518	0.178	0.400	0.606	-0.226	0.590	0.230	0.124	-0.087	-0.380	0.364	-0.187	0.257	-0.055	-0.042
193	-0.125	0.541	0.401	-0.231	1.000	-0.495	-0.528	0.456	-0.511	-0.234	0.487	0.214	-0.063	0.194	0.901	-0.280	-0.146	0.343	0.730	-0.399	0.095	0.114	-0.503	0.286	-0.331	0.573	0.361	0.585	0.409	-0.440	0.473	0.137	0.648	0.727
014	0.206	-0.401	-0.050	0.574	-0.495	1.000	0.588	-0.330	0.694	0.452	-0.458	0.001	0.130	0.111	-0.444	0.385	0.515	-0.406	-0.474	0.569	0.152	0.160	0.749	-0.258	0.628	-0.222	0.225	-0.443	-0.414	0.412	-0.199	0.128	-0.447	-0.450
133	0.080	-0.473	-0.057	0.508	-0.528	0.588	1.000	-0.364	0.642	0.486	-0.391	0.093	0.517	0.102	-0.434	0.321	0.545	-0.271	-0.454	0.655	-0.076	0.085	0.703	-0.101	0.634	-0.047	-0.136	-0.326	-0.321	0.676	-0.324	0.050	-0.382	-0.444
339	-0.248	0.314	0.192	0.059	0.456	-0.330	-0.364	1.000	-0.382	0.155	0.665	0.265	0.158	0.049	0.390	-0.178	-0.272	0.526	0.656	-0.278	0.129	0.132	-0.246	0.321	-0.122	0.271	0.114	0.646	0.407	-0.228	0.446	0.244	0.674	0.705
093	0.059	-0.275	-0.161	0.428	-0.511	0.694	0.642	-0.382	1.000	0.326	-0.381	-0.094	0.189	-0.092	-0.352	0.328	0.467	-0.301	-0.518	0.472	-0.016	0.071	0.765	-0.097	0.520	-0.316	0.125	-0.482	-0.202	0.466	-0.245	-0.001	-0.504	-0.515
243	0.403	-0.058	0.101	0.739	-0.234	0.452	0.486	0.155	0.326	1.000	-0.298	0.316	0.200	0.054	-0.205	0.100	0.369	-0.319	-0.070	0.650	0.134	0.396	0.490	-0.260	0.530	0.047	-0.098	-0.089	-0.317	0.279	-0.074	0.280	-0.024	-0.020
328	-0.457	0.319	0.021	-0.262	0.487	-0.458	-0.391	0.665	-0.381	-0.298	1.000	0.017	0.248	0.005	0.397	-0.180	-0.366	0.945	0.731	-0.495	0.089	-0.083	-0.286	0.716	-0.289	0.232	0.219	0.810	0.747	-0.085	0.598	0.021	0.758	0.738
708	0.335	0.127	0.820	0.517	0.214	0.001	0.093	0.265	-0.094	0.316	0.017	1.000	0.046	0.624	0.191	0.009	0.382	-0.041	0.374	0.132	0.179	0.524	-0.048	-0.202	0.025	0.708	0.047	0.311	-0.288	-0.201	-0.199	0.032	0.323	0.361
204	-0.237	-0.265	-0.022	0.242	-0.063	0.130	0.517	0.158	0.189	0.200	0.248	0.046	1.000	0.071	-0.100	0.280	0.166	0.327	0.133	0.123	0.140	0.048	0.335	0.414	0.477	0.177	-0.082	0.258	0.233	0.442	0.241	0.166	0.203	0.174
353	0.169	-0.162	0.684	0.391	0.194	0.111	0.102	0.049	-0.092	0.054	0.005	0.624	0.071	1.000	0.123	0.150	0.560	0.032	0.255	0.075	0.323	0.094	0.030	-0.064	0.063	0.687	0.229	0.201	-0.285	0.039	-0.048	-0.008	0.200	0.223
148	-0.171	0.545	0.304	-0.201	0.901	-0.444	-0.434	0.390	-0.352	-0.205	0.397	0.191	-0.100	0.123	1.000	-0.314	-0.106	0.276	0.614	-0.327	0.072	0.067	-0.385	0.215	-0.310	0.477	0.343	0.485	0.357	-0.421	0.383	0.221	0.537	0.609
089	0.034	-0.409	0.010	0.295	-0.280	0.385	0.321	-0.178	0.328	0.100	-0.180	0.009	0.280	0.150	-0.314	1.000	0.318	-0.101	-0.238	0.084	0.155	-0.131	0.413	-0.004	0.449	-0.064	0.072	-0.229	-0.232	0.318	-0.101	0.066	-0.249	-0.262
334	0.218	-0.310	0.291	0.663	-0.146	0.515	0.545	-0.272	0.467	0.369	-0.366	0.382	0.166	0.560	-0.106	0.318	1.000	-0.277	-0.117	0.526	0.040	0.096	0.573	-0.154	0.494	0.404	0.144	-0.161	-0.340	0.511	-0.211	-0.010	-0.155	-0.160
332	-0.489	0.228	-0.057	-0.212	0.343	-0.406	-0.271	0.526	-0.301	-0.319	0.945	-0.041	0.327	0.032	0.276	-0.101	-0.277	1.000	0.641	-0.470	0.084	-0.146	-0.197	0.741	-0.249	0.201	0.151	0.756	0.715	0.067	0.523	-0.025	0.686	0.627
128	-0.134	0.457	0.354	-0.037	0.730	-0.474	-0.454	0.656	-0.518	-0.070	0.731	0.374	0.133	0.255	0.614	-0.238	-0.117	0.641	1.000	-0.364	0.205	0.148	-0.438	0.463	-0.298	0.630	0.188	0.935	0.521	-0.313	0.560	0.117	0.965	0.978
017	0.368	-0.200	0.069	0.518	-0.399	0.569	0.655	-0.278	0.472	0.650	-0.495	0.132	0.123	0.075	-0.327	0.084	0.526	-0.470	-0.364	1.000	-0.111	0.396	0.514	-0.257	0.494	-0.018	-0.035	-0.321	-0.329	0.517	-0.155	0.086	-0.325	-0.349
158	0.086	-0.237	0.265	0.178	0.095	0.152	-0.076	0.129	-0.016	0.134	0.089	0.179	0.140	0.323	0.072	0.155	0.040	0.084	0.205	-0.111	1.000	0.084	0.100	-0.014	0.170	0.187	0.257	0.182	-0.023	-0.272	0.310	0.382	0.220	0.235
155	0.480	0.346	0.542	0.400	0.114	0.160	0.085	0.132	0.071	0.396	-0.083	0.524	0.048	0.094	0.067	-0.131	0.096	-0.146	0.148	0.396	0.084	1.000	0.012	-0.105	0.083	0.270	0.220	0.108	-0.066	-0.105	0.014	0.091	0.132	0.161
090	-0.053	-0.461	-0.183	0.606	-0.503	0.749	0.703	-0.246	0.765	0.490	-0.286	-0.048	0.335	0.030	-0.385	0.413	0.573	-0.197	-0.438	0.514	0.100	0.012	1.000	-0.082	0.715	-0.238	0.200	-0.385	-0.209	0.592	-0.124	0.127	-0.415	-0.419
080	-0.424	0.241	-0.174	-0.226	0.286	-0.258	-0.101	0.321	-0.097	-0.260	0.716	-0.202	0.414	-0.064	0.215	-0.004	-0.154	0.741	0.463	-0.257	-0.014	-0.105	-0.082	1.000	-0.185	0.152	0.142	0.534	0.800	0.267	0.616	-0.062	0.508	0.464
082	0.108	-0.477	-0.065	0.590	-0.331	0.628	0.634	-0.122	0.520	0.530	-0.289	0.025	0.477	0.063	-0.310	0.449	0.494	-0.249	-0.298	0.494	0.170	0.083	0.715	-0.185	1.000	-0.121	0.084	-0.263	-0.287	0.472	-0.050	0.319	-0.271	-0.256
374	0.107	0.150	0.717	0.230	0.573	-0.222	-0.047	0.271	-0.316	0.047	0.232	0.708	0.177	0.687	0.477	-0.064	0.404	0.201	0.630	-0.018	0.187	0.270	-0.238	0.152	-0.121	1.000	0.101	0.573	0.073	-0.095	0.128	0.042	0.593	0.612
151	-0.068	0.126	0.252	0.124	0.361	0.225	-0.136	0.114	0.125	-0.098	0.219	0.047	-0.082	0.229	0.343	0.072	0.144	0.151	0.188	-0.035	0.257	0.220	0.200	0.142	0.084	0.101	1.000	0.109	0.144	-0.060	0.332	0.153	0.123	0.180
114	-0.235	0.353	0.250	-0.087	0.585	-0.443	-0.326	0.646	-0.482	-0.089	0.810	0.311	0.258	0.201	0.485	-0.229	-0.161	0.756	0.935	-0.321	0.182	0.108	-0.385	0.534	-0.263	0.573	0.109	1.000	0.549	1.000	0.549	-0.192	0.527	0.08

Tabla 21 Matriz de Correlación Poblacional

Mn	Ln_P	Ln_Sr	Ln_V	Ln_Zn	Ln_Zr	Ln_Ag	Ln_As	Ln_Be	Ln_Bi	Ln_Cd	Ln_Ce	Ln_Co	Ln_Cs	Ln_Ga	Ln_Hf	Ln_Hg	Ln_In	Ln_La	Ln_Lu	Ln_Mo	Ln_Nb	Ln_Ni	Ln_Pb	Ln_Rb	Ln_Sb	Ln_Sc	Ln_Sn	Ln_Tb	Ln_Th	Ln_Ti	Ln_U	Ln_W	Ln_Y	Ln_Yb
.378	0.015	0.001	0.172	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.201	0.171	0.246	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.207	0.344	0.000	0.016	0.000	0.012	0.094	0.000	0.000	0.000	0.014	0.375	0.000	0.000
.006	0.000	0.000	0.433	0.102	0.031	0.003	0.116	0.009	0.480	0.001	0.000	0.396	0.063	0.414	0.033	0.324	0.113	0.000	0.000	0.001	0.007	0.198	0.177	0.000	0.002	0.149	0.183	0.000	0.000	0.031	0.056	0.005	0.001	0.002
.039	0.005	0.194	0.000	0.005	0.036	0.084	0.340	0.184	0.169	0.182	0.341	0.000	0.079	0.005	0.254	0.115	0.107	0.421	0.062	0.052	0.028	0.000	0.395	0.443	0.119	0.001	0.000	0.117	0.498	0.247	0.303	0.377	0.149	0.073
.278	0.000	0.039	0.001	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.488	0.002	0.065	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.395	0.000	0.000	0.000	0.000	0.482	0.028	0.000	0.000	0.026	0.000	0.235	0.000	0.000
.001	0.358	0.065	0.000	0.014	0.000	0.199	0.122	0.000	0.006	0.000	0.004	0.000	0.000	0.007	0.010	0.187	0.375	0.035	0.000	0.232	0.013	0.000	0.253	0.034	0.063	0.000	0.343	0.000	0.121	0.238	0.001	0.025	0.000	0.000
	0.479	0.448	0.000	0.000	0.030	0.448	0.100	0.000	0.185	0.009	0.001	0.000	0.024	0.000	0.077	0.195	0.000	0.001	0.000	0.433	0.063	0.067	0.193	0.222	0.216	0.000	0.072	0.000	0.368	0.377	0.399	0.279	0.000	0.000
.479		0.038	0.001	0.000	0.114	0.023	0.220	0.008	0.285	0.000	0.000	0.000	0.010	0.051	0.049	0.372	0.017	0.000	0.097	0.000	0.205	0.000	0.306	0.000	0.149	0.150	0.255	0.011	0.000	0.296	0.001	0.271	0.049	0.053
.448	0.038		0.056	0.067	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.289	0.001	0.110	0.005	0.059	0.000	0.000	0.001	0.013	0.000	0.026	0.010	0.000	0.000	0.009	0.000	0.074	0.112	0.000	0.000	0.000	0.009	0.253	0.000	0.000
.000	0.001	0.056		0.000	0.000	0.316	0.291	0.031	0.060	0.166	0.419	0.000	0.415	0.000	0.001	0.463	0.002	0.291	0.000	0.254	0.005	0.000	0.038	0.046	0.267	0.000	0.007	0.007	0.023	0.006	0.336	0.385	0.004	0.000
.000	0.000	0.067	0.000		0.012	0.000	0.000	0.284	0.000	0.000	0.005	0.000	0.009	0.000	0.025	0.002	0.000	0.020	0.361	0.000	0.042	0.000	0.000	0.014	0.000	0.012	0.116	0.200	0.000	0.000	0.035	0.006	0.298	0.342
.030	0.114	0.000	0.000	0.012		0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.000	0.019	0.272	0.030	0.000	0.003	0.080	0.000	0.000	0.000	0.180	0.136	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.093	0.000	0.000
.448	0.023	0.000	0.316	0.000	0.000		0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.494	0.104	0.142	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.071	0.061	0.000	0.006	0.000	0.015	0.014	0.000	0.000	0.000	0.027	0.108	0.000	0.000
.100	0.220	0.000	0.291	0.000	0.000	0.000		0.000	0.000	0.000	0.000	0.185	0.000	0.163	0.000	0.001	0.000	0.004	0.000	0.000	0.233	0.205	0.000	0.165	0.000	0.325	0.094	0.001	0.001	0.000	0.001	0.314	0.000	0.000
.000	0.008	0.001	0.031	0.284	0.000	0.001	0.000		0.000	0.067	0.000	0.005	0.063	0.320	0.000	0.042	0.004	0.000	0.000	0.003	0.107	0.100	0.008	0.001	0.120	0.004	0.135	0.000	0.000	0.013	0.000	0.009	0.000	0.000
.185	0.285	0.003	0.060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.001	0.000	0.183	0.034	0.188	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.439	0.246	0.000	0.174	0.000	0.001	0.113	0.000	0.025	0.000	0.008	0.496	0.000	0.000
.009	0.000	0.289	0.166	0.000	0.011	0.000	0.000	0.067	0.001		0.002	0.001	0.026	0.301	0.023	0.168	0.000	0.001	0.250	0.000	0.098	0.000	0.000	0.005	0.000	0.324	0.172	0.196	0.001	0.003	0.238	0.003	0.409	0.424
.001	0.000	0.001	0.419	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002		0.435	0.008	0.482	0.000	0.040	0.000	0.000	0.000	0.000	0.194	0.213	0.002	0.000	0.002	0.012	0.017	0.000	0.000	0.206	0.000	0.420	0.000	0.000
.000	0.000	0.110	0.000	0.000	0.019	0.494	0.185	0.005	0.183	0.001	0.435		0.329	0.000	0.032	0.465	0.000	0.346	0.000	0.100	0.041	0.000	0.322	0.025	0.404	0.000	0.325	0.001	0.002	0.025	0.027	0.381	0.001	0.000
.024	0.010	0.005	0.415	0.009	0.272	0.104	0.000	0.063	0.034	0.026	0.008	0.329		0.248	0.166	0.003	0.054	0.001	0.099	0.117	0.089	0.322	0.000	0.000	0.000	0.043	0.215	0.006	0.012	0.000	0.009	0.053	0.024	0.046
.000	0.051	0.059	0.000	0.000	0.030	0.142	0.163	0.320	0.188	0.301	0.482	0.000	0.248		0.117	0.074	0.000	0.378	0.006	0.235	0.001	0.183	0.386	0.269	0.271	0.000	0.013	0.025	0.003	0.354	0.321	0.468	0.026	0.015
.077	0.049	0.000	0.001	0.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.023	0.000	0.032	0.166	0.117		0.001	0.154	0.003	0.000	0.001	0.243	0.258	0.000	0.018	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.000	0.000
.195	0.372	0.000	0.463	0.002	0.003	0.000	0.001	0.042	0.001	0.168	0.040	0.465	0.003	0.074	0.001		0.001	0.165	0.010	0.210	0.067	0.104	0.000	0.486	0.000	0.268	0.244	0.013	0.012	0.001	0.165	0.263	0.007	0.005
.000	0.017	0.001	0.002	0.000	0.080	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.054	0.000	0.154	0.001		0.003	0.129	0.000	0.351	0.177	0.000	0.068	0.000	0.000	0.082	0.060	0.000	0.000	0.020	0.463	0.067	0.060
.001	0.000	0.013	0.291	0.020	0.000	0.000	0.004	0.000	0.001	0.001	0.000	0.346	0.001	0.378	0.003	0.165	0.003		0.000	0.000	0.210	0.079	0.028	0.000	0.008	0.025	0.073	0.000	0.000	0.259	0.000	0.404	0.000	0.000
.000	0.097	0.000	0.000	0.361	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.250	0.000	0.000	0.099	0.006	0.000	0.010	0.129	0.000		0.000	0.023	0.077	0.000	0.000	0.002	0.000	0.034	0.000	0.000	0.001	0.000	0.129	0.000	0.000
.433	0.000	0.026	0.254	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.100	0.117	0.235	0.001	0.210	0.000	0.000	0.000		0.141	0.000	0.000	0.006	0.000	0.432	0.369	0.001	0.001	0.000	0.067	0.205	0.001	0.000
.063	0.205	0.010	0.005	0.042	0.180	0.071	0.233	0.107	0.439	0.098	0.194	0.041	0.089	0.001	0.243	0.067	0.351	0.210	0.023	0.141		0.210	0.168	0.446	0.050	0.035	0.006	0.039	0.413	0.004	0.001	0.000	0.016	0.011
.067	0.000	0.000	0.000	0.000	0.136	0.061	0.205	0.100	0.246	0.000	0.213	0.000	0.322	0.183	0.258	0.104	0.177	0.079	0.077	0.000	0.210		0.454	0.157	0.211	0.004	0.016	0.149	0.261	0.155	0.445	0.191	0.101	0.059
.193	0.306	0.000	0.038	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.002	0.322	0.000	0.386	0.000	0.000	0.000	0.028	0.000	0.000	0.168	0.454		0.216	0.000	0.010	0.026	0.000	0.021	0.000	0.115	0.111	0.000	0.000
.222	0.000	0.009	0.046	0.014	0.002	0.006	0.165	0.001	0.174	0.005	0.000	0.025	0.000	0.269	0.018	0.486	0.068	0.000	0.000	0.006	0.446	0.157	0.216		0.037	0.071	0.086	0.000	0.000	0.004	0.000	0.275	0.000	0.000
.216	0.149	0.000	0.267	0.000	0.001	0.000	0.000	0.120	0.000	0.000	0.002	0.404	0.000	0.271	0.001	0.000	0.000	0.008	0.002	0.000	0.050	0.211	0.000	0.037		0.122	0.210	0.005	0.002	0.000	0.317	0.001	0.004	0.006
.000	0.150	0.074	0.000	0.012	0.000	0.015	0.325	0.004	0.001	0.324	0.012	0.000	0.043	0.000	0.000	0.268	0.000	0.025	0.000	0.432	0.035	0.004	0.010	0.071	0.122		0.166	0.000	0.242	0.180	0.109	0.343	0.000	0.000
.072	0.255	0.112	0.007	0.116	0.000	0.014	0.094	0.135	0.113	0.172	0.017	0.325	0.215	0.013	0.000	0.244	0.082	0.073	0.034	0.369	0.006	0.016	0.026	0.086	0.210	0.166		0.146	0.082	0.282	0.001	0.069	0.118	0.041
.000	0.011	0.000	0.007	0.200	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.196	0.000	0.001	0.006	0.025	0.000	0.013	0.060	0.000	0.000	0.001	0.039	0.149	0.000	0.000	0.005	0.000	0.146		0.000	0.031	0.000	0.202	0.000	0.000
.368	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.025	0.001	0.000	0.002	0.012	0.003	0.000	0.01																		

El estadístico que permite realizar este contraste es el coeficiente de Barlett que bajo el supuesto de normalidad de la muestra se distribuye como una X^2 con $(k^2 - k)$ grados de libertad. Su expresión es la siguiente:

$$X^2_{(k^2 - k)} = - \left[n-1 - \frac{1}{6} (2k+5) \right] \ln |R|$$

Tabla 22 KMO y prueba de Barlett

Medida de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin.	0.791
Prueba de esfericidad de Bartlett	Chi-cuadrado aproximado 4767.260
	gl 780.000
	Sig. 0.000

Según el valor aproximado $X^2 = 4767.260$ de la tabla 22, podemos rechazar al 5% la hipótesis nula, lo que implica que las variables están correlacionadas.

Para poder realizar el análisis de componentes principales, es necesario determinar la medida de adecuación de la muestra empleando el coeficiente de Kaiser-Meyer-Olkin, cuya expresión es:

$$KMO = \frac{\sum_{i+j} r_{ij}^2}{\sum_{i+j} r_{ij}^2 + a_{ij}^2}$$

Donde: r_{ij} : son los coeficientes de correlación observados
 a_{ij} : son los coeficientes de correlación parciales

La muestra será más adecuada cuanto más próxima esté a 1 este coeficiente (KMO), ya que esto supone que los coeficientes de correlación parcial entre las variables originales será pequeño. Se considera aceptable la muestra cuando el coeficiente es superior a 0.6 (García e Ibar, 2001), en nuestro caso el valor es 0.791 (tabla 22), lo que indica que las variables originales si son adecuadas para realizar el análisis de componentes principales.

Previa a la extracción de componentes, se procedió a la determinación de las comunalidades, que viene a ser la proporción de la varianza explicada por los factores comunes en una variable (tabla 23). La selección de componentes principales se realiza empleando el gráfico de sedimentación (Cattell, 1966), ver figura 18, el cual se genera a partir de la varianza total explicada (tabla 24).

Tabla 23 Comunalidades

Variable	Inicial	Extracción
Au	1.000	0.510
Ba	1.000	0.828
Cr	1.000	0.900
Cu	1.000	0.747
Li	1.000	0.727
Mn	1.000	0.797
P	1.000	0.596
Sr	1.000	0.820
V	1.000	0.892
Zn	1.000	0.879
Zr	1.000	0.890
Ag	1.000	0.779
As	1.000	0.842
Be	1.000	0.737
Bi	1.000	0.740
Cd	1.000	0.884
Ce	1.000	0.935
Co	1.000	0.908
Cs	1.000	0.772
Ga	1.000	0.818
Hf	1.000	0.832
Hg	1.000	0.488
In	1.000	0.873
La	1.000	0.904
Lu	1.000	0.916
Mo	1.000	0.781
Nb	1.000	0.709
Ni	1.000	0.940
Pb	1.000	0.869
Rb	1.000	0.828
Sb	1.000	0.762
Sc	1.000	0.931
Sn	1.000	0.791
Tb	1.000	0.892
Th	1.000	0.852
Tl	1.000	0.831
U	1.000	0.784
W	1.000	0.581
Y	1.000	0.915
Yb	1.000	0.937

Método de extracción: Análisis de Componentes principales.

Tabla 24 Varianza Total Explicada

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	12.034	30.084	30.084	12.034	30.084	30.084	8.396	20.991	20.991
2	6.813	17.032	47.116	6.813	17.032	47.116	7.330	18.326	39.317
3	4.473	11.183	58.299	4.473	11.183	58.299	5.199	12.997	52.314
4	2.373	5.933	64.233	2.373	5.933	64.233	2.762	6.904	59.218
5	2.132	5.329	69.562	2.132	5.329	69.562	2.686	6.715	65.932
6	2.021	5.052	74.614	2.021	5.052	74.614	2.644	6.611	72.543
7	1.376	3.440	78.054	1.376	3.440	78.054	2.030	5.074	77.617
8	1.194	2.985	81.039	1.194	2.985	81.039	1.369	3.422	81.039
9	0.942	2.356	83.395						
10	0.790	1.976	85.370						
11	0.644	1.609	86.980						
12	0.633	1.582	88.561						
13	0.583	1.456	90.018						
14	0.495	1.237	91.255						
15	0.411	1.028	92.283						
16	0.388	0.969	93.252						
17	0.333	0.833	94.085						
18	0.289	0.723	94.808						
19	0.265	0.663	95.471						
20	0.228	0.570	96.040						
21	0.220	0.549	96.590						
22	0.199	0.497	97.087						
23	0.148	0.370	97.457						
24	0.133	0.332	97.789						
25	0.121	0.302	98.090						
26	0.112	0.281	98.371						
27	0.102	0.255	98.626						
28	0.095	0.237	98.863						
29	0.085	0.212	99.075						
30	0.074	0.185	99.259						
31	0.065	0.161	99.421						
32	0.056	0.140	99.561						
33	0.048	0.119	99.680						
34	0.036	0.091	99.771						
35	0.027	0.067	99.838						
36	0.021	0.053	99.891						
37	0.017	0.041	99.932						
38	0.013	0.033	99.966						
39	0.009	0.023	99.988						
40	0.005	0.012	100.000						

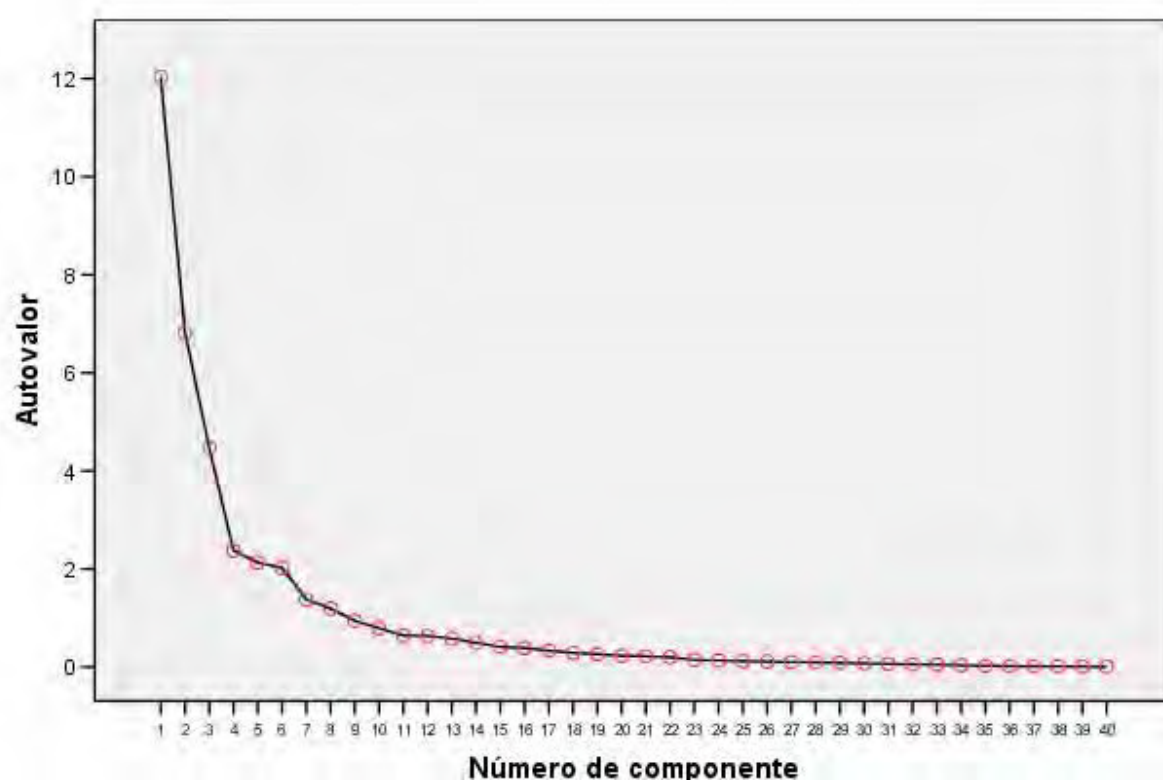


Figura 18 Gráfico de Sedimentación

En la tabla de comunalidades, la primera columna contiene las comunalidades iniciales que son iguales a uno, lo que indica que con todas las componentes se explica toda la varianza de cada una de las variables originales. En la segunda columna tenemos la comunalidad correspondiente a cada variable después de la extracción de las componentes, ya que la varianza de la variable se descompone en la parte de la varianza que es debida a los componentes comunes y la debida a los componentes no comunes (únicos).

De la tabla 24 podemos observar que los 8 primeros componentes son los que superan la unidad en cuanto a las raíces características se refiere (autovalores, cargas o ponderaciones) y todos ellos suman el 81.039% de la varianza total. Además dichos componentes son los que se encuentran fuera de la zona de sedimentación (figura 18), por lo que según el criterio de Cattell (1966), sólo seleccionaremos estos 8 componentes, los que permitirán reducir el número de

variables, recogiendo las mayores proporciones de varianza sin perder información significativa.

Se realiza nuevamente el análisis de componentes principales, pero ahora especificaremos el número de componentes a extraer, en este caso son 8, obteniéndose la matriz de componentes (tabla 25). Para conseguir una correcta interpretación de cada uno de los factores se procede a su rotación. Ésta consiste en realizar un giro de los ejes de ordenadas de los factores respecto a las variables para que las correlaciones entre ellas sean o muy pequeñas (próximas a cero) o muy grande (próximas a uno).

Existen dos formas de realizar la rotación de los factores: la rotación ortogonal y la rotación oblicua.

La rotación ortogonal consiste en girar los ejes de tal forma que sigan siendo entre sí perpendiculares para que los factores no dejen de estar ínter correlacionados. El procedimiento de rotación ortogonal que vamos a utilizar es el varimax normalizado que consiste en maximizar la suma de las varianzas de las cargas factoriales al cuadrado dentro de cada factor, dividida por la comunalidad de la variable correspondiente, para evitar que las variables con mayores comunalidades tengan más peso en la solución final. De todo esto se obtiene la matriz de componentes rotados (tabla 26).

Analizando los valores de la matriz de componentes rotados podemos observar que no todas las variables presentan ponderaciones en cada uno de los componentes, es por ello que debemos afinar aún más la selección de variables a trabajar, entonces seleccionaremos solo las variables con mayores ponderaciones de los cuatro primeros componentes principales incluyendo al Cu y P, por tener las ponderaciones negativas más significativas, quedando un total de 30 variables, excluyéndose así: Cs, Au, W, Nb, Sr, Hf, Hg, Zr, Sn y Li.

Con esta nueva selección de variables realizamos un nuevo análisis de componentes principales hasta llegar a obtener la matriz de componentes rotados (tabla 27), en la que sólo 6 componentes superan la unidad en cuanto a raíces características se refiere, de esta manera todas las variables tienen ponderaciones en cada una de las 6 componentes principales.

Tabla 25 Matriz de Componentes

Variable	Componente							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ce	0.835		0.425				-0.126	0.174
La	0.737		0.532	-0.180			-0.139	0.158
Rb	0.560		0.645	-0.101	0.201	0.138		-0.163
Th	0.676	-0.183	0.500	0.102	0.242	0.160		-0.129
Tb	0.850	0.324	0.195		-0.154			
Y	0.862	0.349	0.126		-0.153			
Yb	0.871	0.382		0.113				
Lu	0.872	0.374						
U	0.585		0.393	0.438	0.192	-0.131		-0.178
Ba	0.447		0.400	-0.502	0.312	0.243		0.227
Be	0.657	0.275	0.143	0.253	-0.183			0.318
Cu	-0.645	0.409	-0.209		0.328		0.103	
P	-0.335	0.327	-0.533	0.149		0.253		
Cs		0.347	0.666		-0.205		-0.211	-0.346
Pb	-0.654	0.297	0.535		0.127		0.113	0.168
As	-0.659	0.340	0.426	-0.110	-0.170	0.177		-0.192
Tl	-0.437	0.130	0.667	-0.254		0.258	0.155	-0.152
Bi	-0.673	0.138	0.369		0.322			0.125
Sb	-0.562	0.413	0.417	0.270		-0.135		
Ag	-0.724	0.321	0.246	0.156	0.200			0.131
Mo	-0.611	0.391		0.176		0.389	0.183	-0.175
Zn	-0.419	0.757	0.120					0.311
In	-0.457	0.606	0.129	-0.319			0.397	-0.106
Cd	-0.381	0.561		0.397	-0.300	0.319	0.111	0.235
Au	-0.638	0.150	0.149		0.207			
Sc	0.437	0.689	-0.188	-0.312	-0.120		0.168	-0.290
Ga		0.658	-0.170	-0.450		-0.369		
Co	0.126	0.791	-0.369	-0.276	-0.132		-0.107	0.143
V	0.192	0.725	-0.460	-0.225	0.143		-0.170	-0.119
Mn	0.232	0.656		-0.376	-0.173			0.362
Ni		0.578	-0.296	0.265	0.312	0.486	-0.329	
Cr		0.553	-0.167		0.497	0.125	-0.510	-0.200
W		0.266		0.616	-0.100	-0.306	0.113	
Nb		0.355		0.344		-0.612	-0.286	
Sr	0.540		-0.291	0.127	0.310	0.510	0.201	0.176
Hf	0.656	0.169	-0.211	0.123	0.253	-0.112	0.477	
Hg	-0.370	0.180	0.313	-0.169		-0.349	-0.261	
Zr	0.759	0.222	-0.225		0.225	-0.118	0.325	-0.183
Sn	0.132	0.293		0.142	0.736	-0.320		0.113
Li	0.345	0.565		0.254	-0.349	0.146		-0.257

Tabla 26 Matriz de Componentes Rotados

Variable	Componente							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ce	0.913	-0.267						0.135
La	0.907	-0.174		-0.100	-0.114			0.112
Rb	0.853				-0.178			-0.229
Th	0.827	-0.133	-0.248			0.179		-0.212
Tb	0.776	-0.270	0.365		0.148	0.174	-0.148	
Y	0.736	-0.286	0.372		0.232	0.262	-0.132	
Yb	0.701	-0.308	0.400		0.283	0.304		
Lu	0.686	-0.324	0.438		0.208	0.304		
U	0.682		-0.125		0.426	0.166	0.153	-0.254
Ba	0.643				-0.581		0.221	0.154
Be	0.610	-0.199	0.144		0.322	0.180	-0.119	0.382
Cu	-0.547	0.494	0.220	0.260			0.296	
P	-0.529		0.165	0.451		0.188	-0.122	0.159
Cs	0.491	0.455			0.129	-0.334	-0.339	-0.254
Pb		0.866				-0.228	0.167	0.107
As	-0.160	0.809				-0.223	-0.290	-0.113
Tl	0.148	0.778		-0.139	-0.334	-0.136	-0.155	-0.163
Bi	-0.197	0.746	-0.195		-0.133	-0.140	0.253	
Sb	-0.106	0.744			0.364	-0.244		
Ag	-0.317	0.732		0.102	0.158	-0.214	0.222	
Mo	-0.324	0.717		0.255		0.193	-0.229	
Zn	-0.132	0.685	0.402	0.194	0.183			0.399
In	-0.221	0.679	0.567	-0.108				-0.121
Cd	-0.151	0.609		0.209	0.350	0.211	-0.345	0.389
Au	-0.339	0.541				-0.205	0.214	
Sc	0.231		0.876	0.132		0.181	-0.109	-0.195
Ga			0.870			-0.168	0.139	
Co			0.811	0.369			-0.105	0.313
V		-0.127	0.773	0.510			0.109	
Mn	0.278	0.134	0.713					0.432
Ni		0.137	0.153	0.911		0.227		
Cr			0.258	0.861		-0.143	0.231	
W		0.145			0.736			
Nb			0.212	0.121	0.675	-0.382	0.193	
Sr	0.254	-0.307		0.299	-0.165	0.705	0.121	0.176
Hf	0.315	-0.314	0.315		0.217	0.591	0.311	-0.197
Hg		0.343				-0.577	0.154	
Zr	0.395	-0.407	0.376		0.226	0.501	0.246	-0.246
Sn	0.191	0.123	0.119	0.223	0.202		0.791	
Li	0.349		0.361	0.304	0.387	0.117	-0.459	

Método de rotación: Normalización Varimax con Kaiser.

Variables con mayor ponderación en cada uno de los cuatro primeros factores.

Variables con mínima ponderación.

Tabla 27 Matriz de Componentes Rotados (segundo procesamiento)

Variable	Componente					
	1	2	3	4	5	6
Y	0.888	-0.246	0.280	0.084	0.030	0.106
Yb	0.872	-0.275	0.296	0.057	0.083	0.129
Tb	0.855	-0.226	0.283	0.190	0.017	0.100
Lu	0.838	-0.298	0.346	0.092	0.079	0.096
U	0.789	-0.021	-0.199	0.076	0.047	-0.282
Ce	0.735	-0.223	0.001	0.565	-0.034	0.143
Be	0.700	-0.145	0.026	0.084	0.070	0.499
Th	0.670	-0.130	-0.289	0.502	0.022	-0.252
La	0.655	-0.129	0.028	0.652	-0.119	0.083
Rb	0.611	0.052	-0.105	0.601	-0.040	-0.311
Cu	-0.523	0.436	0.254	-0.183	0.370	-0.027
P	-0.226	0.043	0.189	-0.565	0.420	-0.009
Pb	-0.210	0.891	-0.066	0.079	-0.041	0.089
As	-0.262	0.806	0.103	-0.003	-0.035	-0.045
Sb	-0.053	0.787	-0.025	-0.208	-0.005	0.101
Tl	-0.048	0.760	-0.002	0.258	-0.164	-0.288
Ag	-0.309	0.745	-0.032	-0.154	0.126	0.012
Bi	-0.385	0.728	-0.156	0.161	0.137	-0.019
Zn	-0.011	0.706	0.382	-0.206	0.226	0.344
Mo	-0.124	0.691	0.026	-0.395	0.244	-0.183
In	-0.153	0.652	0.601	-0.116	-0.036	-0.209
Cd	0.150	0.643	0.030	-0.505	0.167	0.374
Ga	0.009	0.083	0.892	-0.010	0.032	-0.081
Sc	0.393	-0.094	0.835	-0.049	0.149	-0.119
Co	0.079	0.019	0.772	-0.111	0.391	0.374
V	0.044	-0.134	0.738	-0.075	0.550	0.085
Mn	0.236	0.162	0.686	0.206	0.016	0.466
Ba	0.206	-0.065	0.079	0.856	0.054	0.054
Cr	0.040	0.059	0.216	0.097	0.883	-0.035
Ni	0.116	0.119	0.103	-0.196	0.914	0.091

Método de rotación: Normalización Varimax con Kaiser.

Variables con mayor ponderación en cada uno de los cinco primeros factores.

Variables con mínima ponderación.

7.3 ASOCIACIONES GEOQUÍMICAS

Algunos pares o grupos de elementos muestran consistentemente una estrecha asociación casi indiferente al ambiente en el cual ellos ocurren. En muchos casos se debe a que el socio menos abundante sustituye libremente en el retículo cristalino al socio más abundante de dicho cristal.

La asociación o agrupación geoquímica de dos o más elementos es muy importante en el campo de la geoquímica aplicada. En la presente investigación, se determinaron las asociaciones geoquímicas entre los elementos lantánidos y los principales elementos traza, empleando el análisis de componentes principales una vez realizada la determinación final de la matriz de componentes rotados.

Se identifican las variables con mayor ponderación en cada uno de los componentes principales, en la tabla 27 se resalta en color rojo las variables con mayor ponderación en los cinco primeros componentes principales, dichos componentes expresan más del 70% de la varianza total, proporción significativa que nos garantiza interpretaciones confiables.

Bajo este criterio se afirma que dichos conjuntos de variables se encuentran íntimamente relacionados entre sí, representando importantes asociaciones geoquímicas, en orden de importancia, estas son:

Componente 1: Y, Yb, Tb, Lu, U, Ce, Be, Th, La y Rb.

Componente 2: Pb, As, Sb, Tl, Ag, Bi, Zn, Mo, In y Cd.

Componente 3: Ga, Sc, Co, V, Mn.

Componente 4: Ba, La.

Componente 5: Cr, Ni

Las variables Cu, P, Zr y Hf presentan las menores ponderaciones en la matriz de componentes rotados, lo que significa que dichos elementos presentan un comportamiento geoquímico opuesto, referidos principalmente a las asociaciones geoquímicas de las componentes 1 y 2.

En las figuras 19 a 22, se muestra gráficamente el grado de afinidad entre las variables de mayor ponderación en las tres primeras componentes, ratificándose de manera estadística las asociaciones geoquímicas que existen en los sedimentos activos de corriente cuya fuente primaria fueron tobas ácidas de los Volcánicos Huambos. Además del comportamiento geoquímico opuesto del Cu y el P.

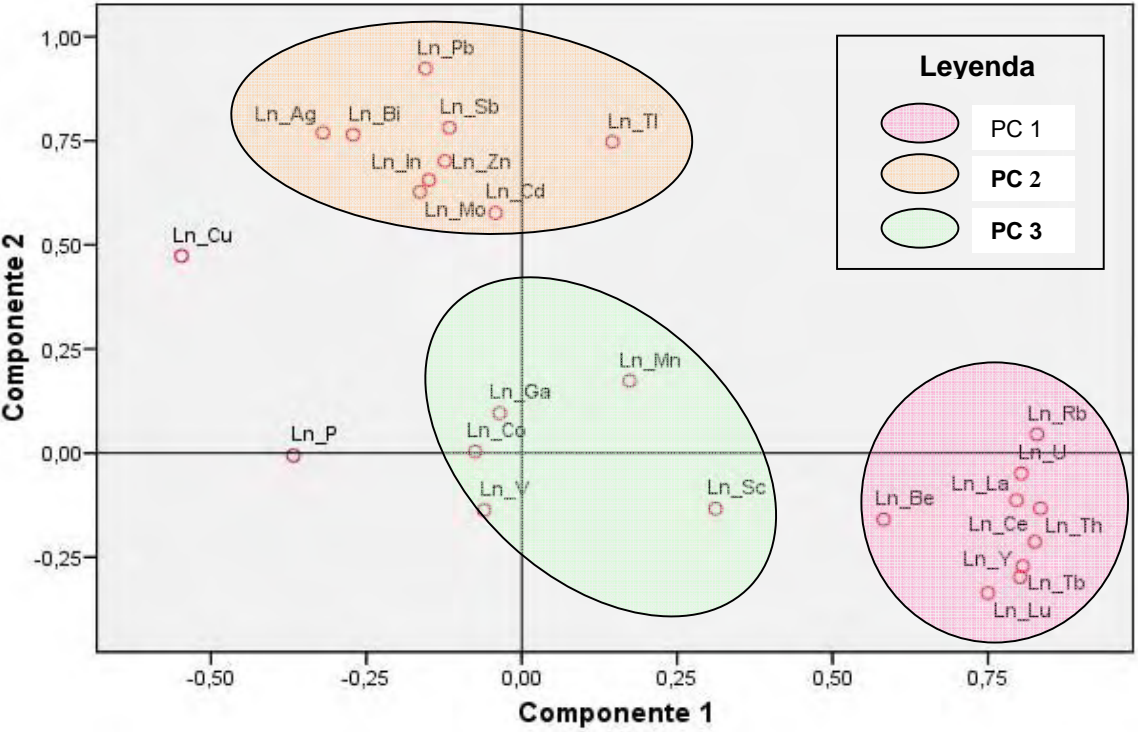


Figura 19 Asociaciones Geoquímicas PC1-PC2

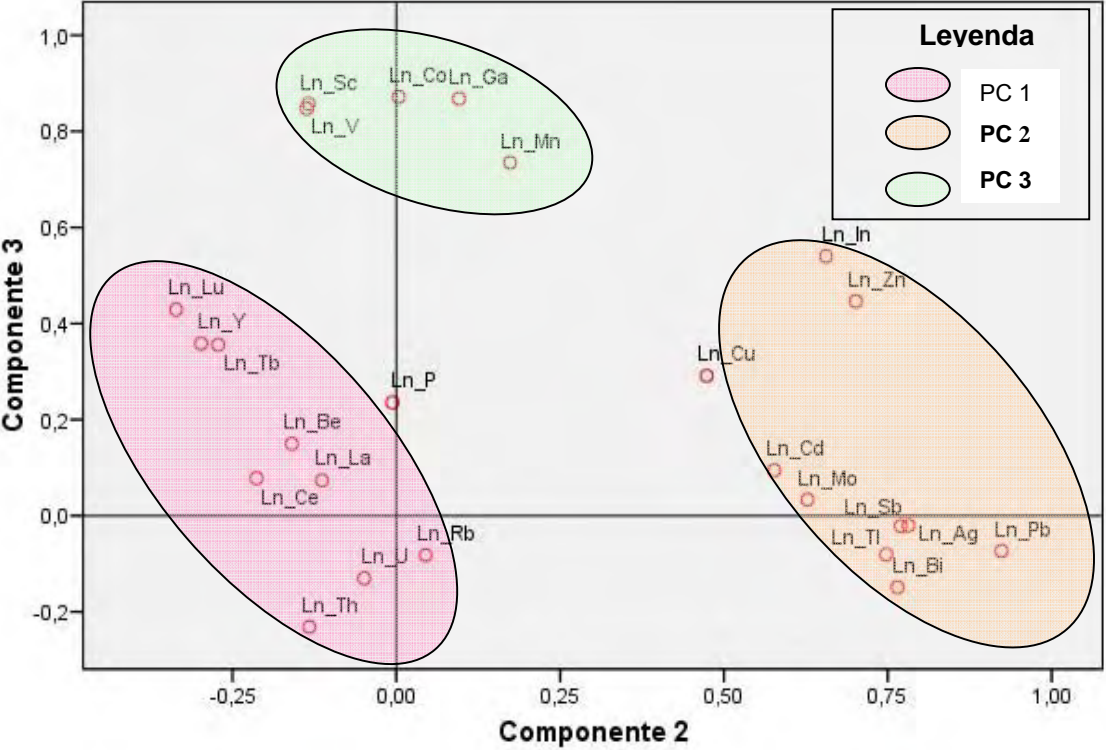


Figura 20 Asociaciones Geoquímicas PC2-PC3

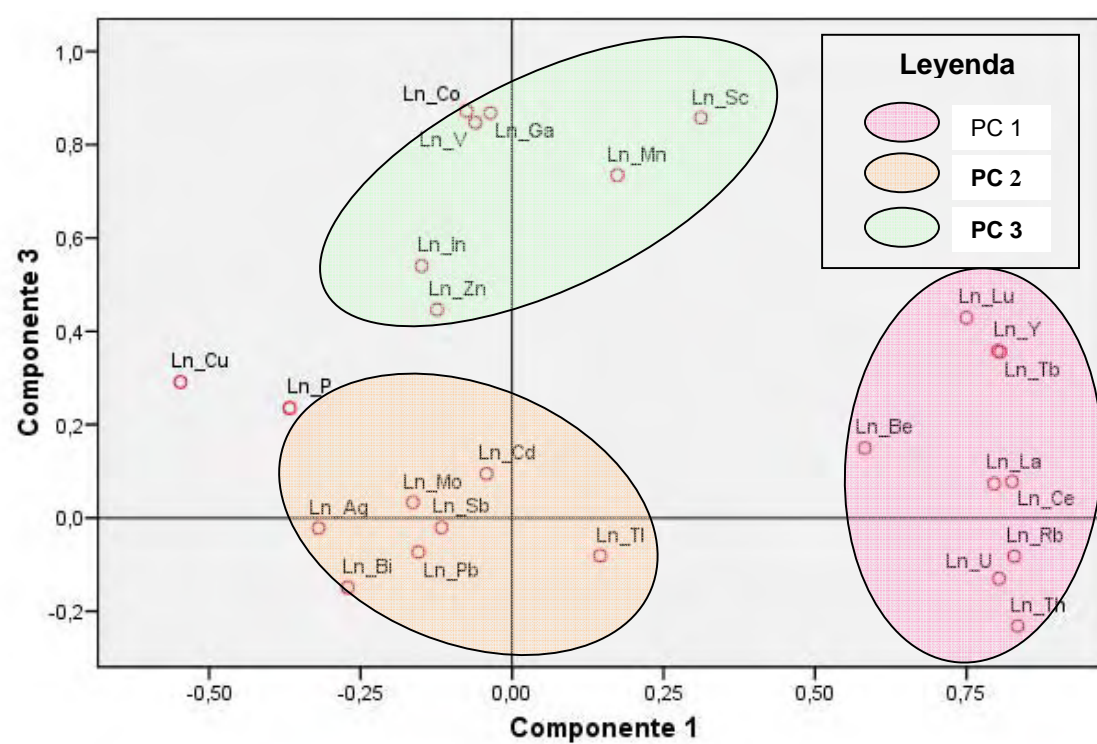


Figura 21 Asociaciones Geoquímicas PC1-PC3

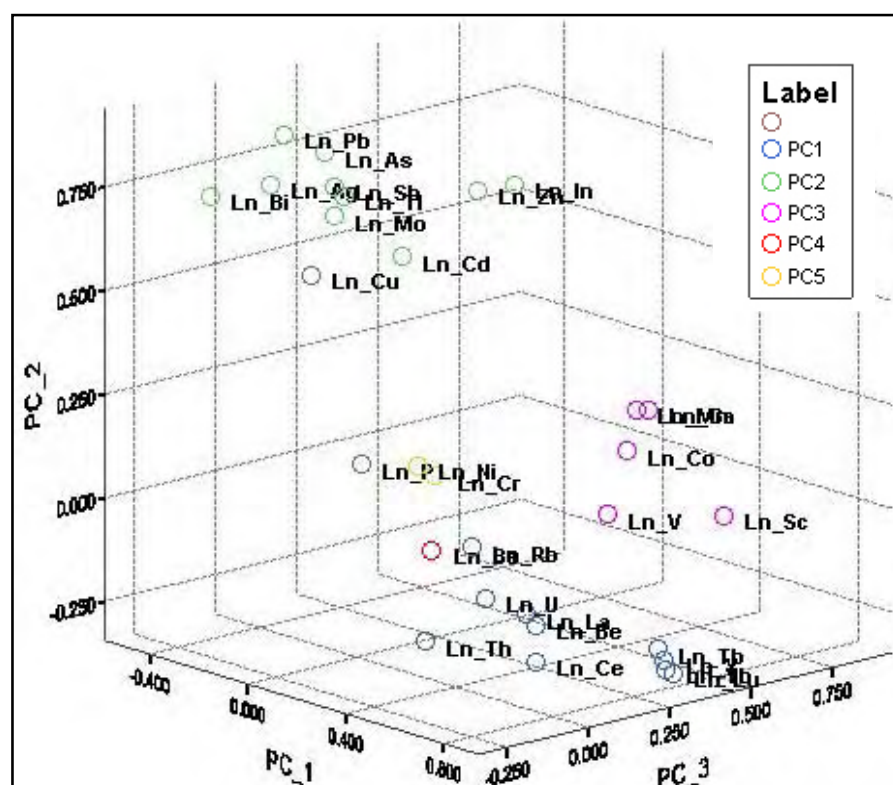


Figura 22 Asociaciones Geoquímicas PC1-PC2-PC3

7.4 PATRONES DE DISPERSIÓN GEOQUÍMICA

7.4.1 Patrones de dispersión geoquímica secundaria

Las características de los patrones de dispersión geoquímica secundaria, son consecuencias naturales de los procesos dinámicos de dispersión. La presente tesis estudia los patrones de dispersión geoquímica del tipo epigenético clástico y según el fraccionamiento de los elementos corresponde a una dispersión mecánica, es el caso de las “tierras raras”, que permanecen relativamente estables en condiciones supérgenas, quedando restringida la acción del intemperismo químico.

Los patrones de dispersión geoquímica secundaria se determinaron a lo largo de las sub-cuencas más representativas del área de estudio, en la cual se analiza y compara la variabilidad de las concentraciones de los elementos lantánidos (incluidos el Sc e Y) y los 46 elementos traza restantes determinados por ICP-MS.

Esta variabilidad se representó ordenando las concentraciones de los elementos siguiendo la dirección del drenaje. Se definieron dos sectores: El primer sector se denomina La Zanja Este, sigue el recorrido a lo largo de todo el río Pisit, aguas abajo del distrito de Pulán toma el nombre de río Cañad, posteriormente confluye con el río Chancay hasta confluir con el río San Lorenzo. Todo este trayecto abarca una longitud aproximada de 22 km., en las cuales se controló la variabilidad de las concentraciones de los elementos lantánidos a través de 16 estaciones de muestreo.

El segundo sector denominado La Zanja Oeste, sigue el curso de las aguas del río San Lorenzo hasta su desembocadura con el río Chancay, con un total 12 estaciones de muestreo y una longitud de 25 km. aproximadamente. De esta manera se pudo caracterizar los halos de dispersión geoquímica secundaria (ver figura 23).

A continuación se mostrarán los diferentes patrones de dispersión de los principales elementos lantánidos y otros elementos traza, enfatizando aquellos que muestran patrones de dispersión similares y los que presentan contrastes geoquímicos notables en sus patrones de dispersión. En el sector denominado **La Zanja Este**, de acuerdo a la variabilidad de las concentraciones a lo largo del drenaje principal, se observaron tres patrones de dispersión bien definidos, el

DISPERSIÓN GEOQUÍMICA SECUNDARIA DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS LANTÁNIDOS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS CHANCAY-LAMBAYEQUE

primero representado por el La, Ce y Rb, los que muestran una variabilidad de concentraciones similar, donde el Ce resultó ser el elemento más abundante. El elemento Cu presenta un patrón de dispersión disímil, con respecto a los elementos lantánidos citados anteriormente (figura 24).

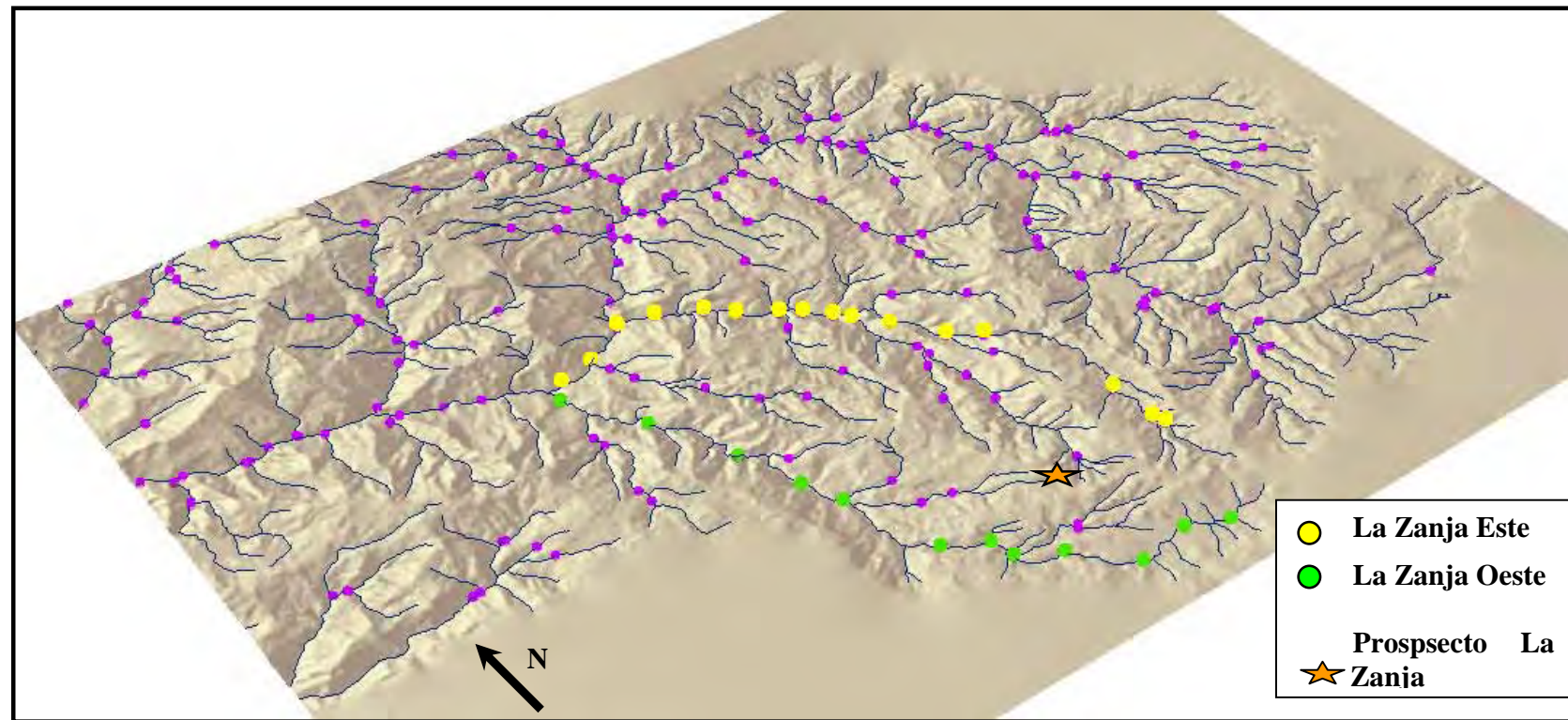


Figura 23 Sectores: La Zanja Este y La Zanja Oeste, (Patrones de dispersión)

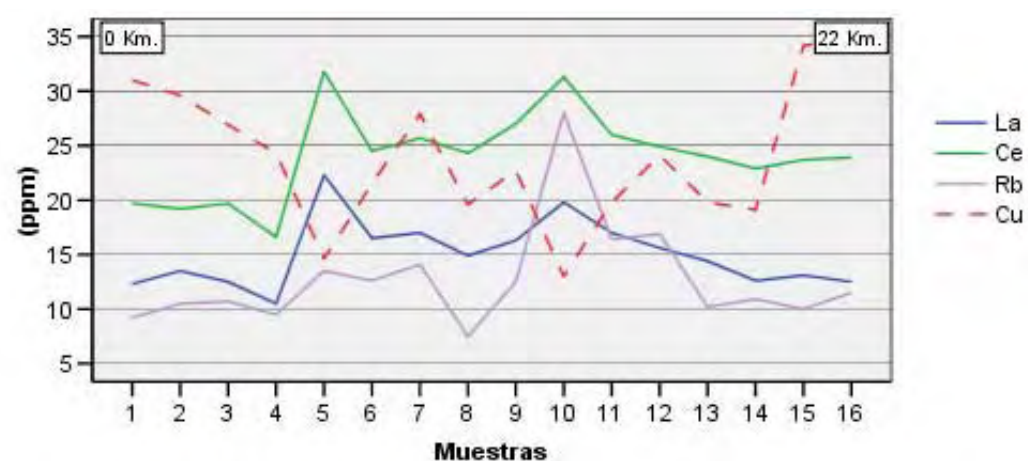


Figura 24 Variabilidad La-Ce-Rb-Cu, sector La Zanja Este

El segundo patrón de dispersión geoquímica es representado por la variabilidad de las concentraciones del Yb, Tb y Lu a lo largo del drenaje principal del sector La Zanja Este, mientras que para el caso del Hf, éste muestra un patrón similar. Siendo el Yb el elemento más abundante (ver figura 25).

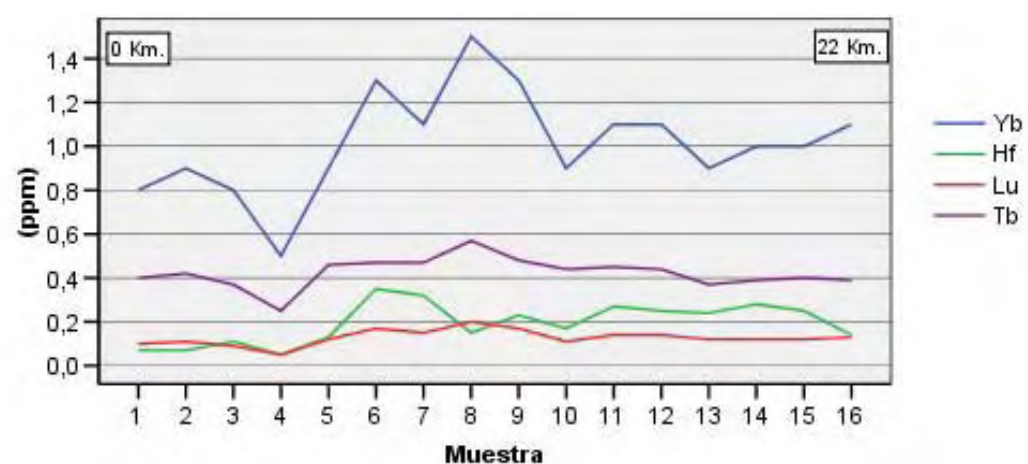


Figura 25 Variabilidad Yb-Hf-Lu-Tb, sector La Zanja Este

El tercer patrón de dispersión geoquímica está conformado por los elementos: Sc, Y, Co, Ga, Zr, Al y V, siendo los elementos con mayor concentración el V, Co e Y. (ver figuras 26 y 27). Las aguas de la cuenca del río Chancay –Lambayeque durante el periodo de muestreo (estiaje) presentó un carácter promedio del tipo bicarbonatado cálcico (Vargas & Chira, 2006), en este sector el pH fue de 7.43-9.76.

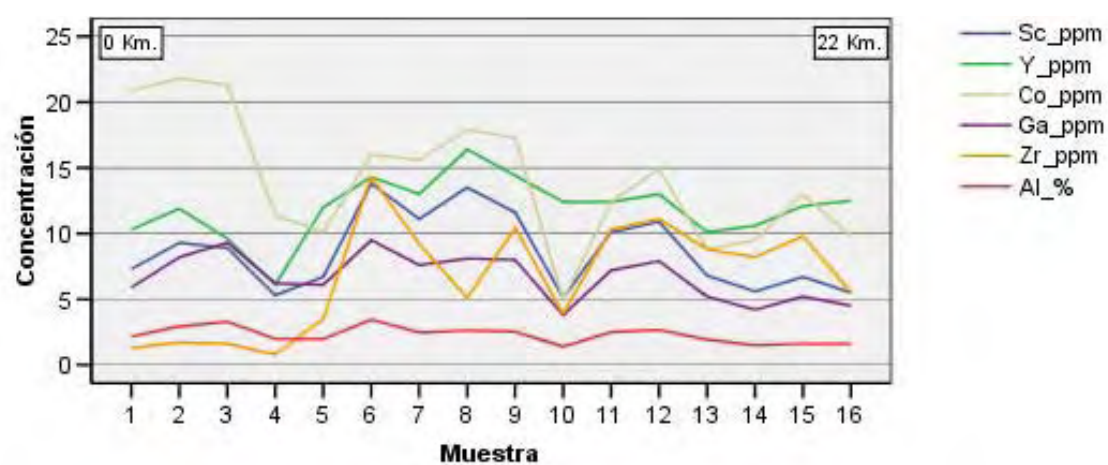


Figura 26 Variabilidad Sc-Y-Co-Ga-Zr-Al, sector La Zanja Este

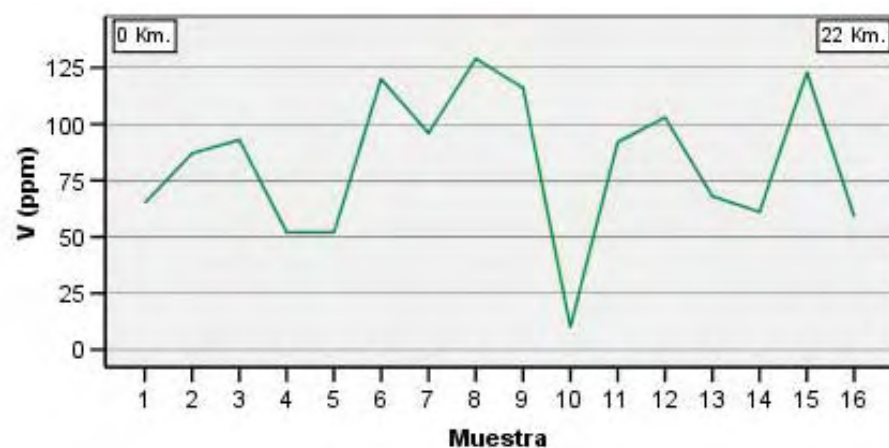


Figura 27 Variabilidad V, sector La Zanja Este

En el sector **La Zanja Oeste**, se encontró dos patrones de dispersión. El primero de ellos representado por las concentraciones geoquímicas del La, Ce, Rb, Y y As, los que muestran una misma tendencia en su distribución a lo largo del drenaje principal de la sub-cuenca del río San Lorenzo, donde las mayores concentraciones fueron las del As, seguidas del Ce (figura 28).

Las aguas de escorrentía de este sector son del tipo bicarbonatada y sulfatada cálcica, con un predominio de la facie bicarbonatada cálcica. Los valores de pH van de 7.66 – 9.3.

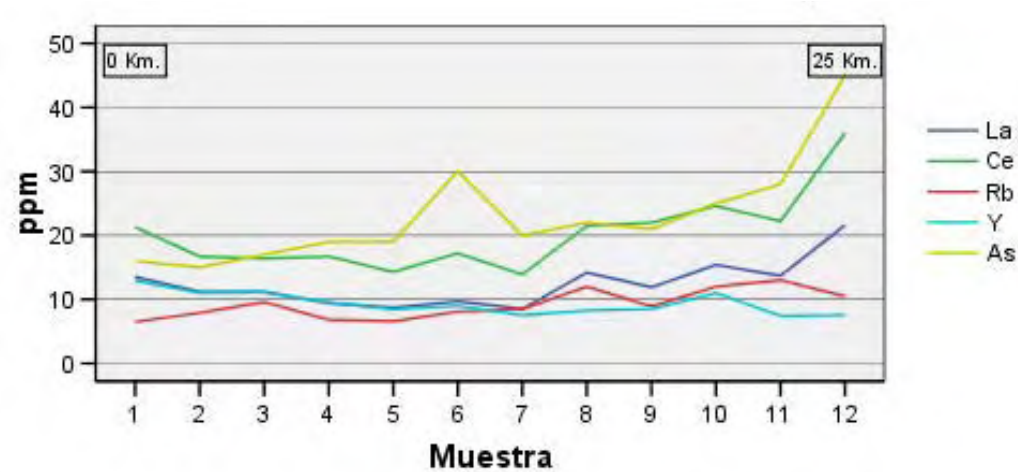


Figura 28 Variabilidad La-Ce-Rb-Y-As, sector La Zanja Oeste

El segundo patrón de dispersión lo componen el Tb e Yb, donde a lo largo del drenaje principal las concentraciones de estos elementos decrecen, conforme los sedimentos discurren hacia el río Chancay, ver figura 29.

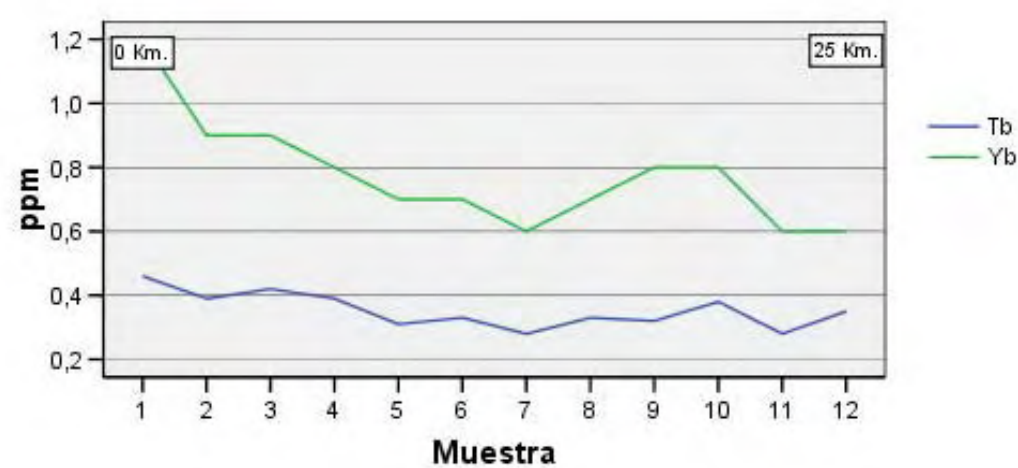


Figura 29 Variabilidad Tb-Yb, sector La Zanja Oeste

7.4.2 Distribución Geoquímica

Los elementos que forman el grupo de los lantánidos, forman un grupo geoquímico bastante coherente, en consecuencia se cree que muestran todavía las relaciones originales de abundancia. De manera contraria a lo que se ha hecho con la mayoría de los otros elementos, la abundancia media de los lantánidos en la litosfera superior no se ha determinado en las rocas ígneas sino en los sedimentos arcillosos. Esta metodología es correcta, ya que no se encuentran cantidades apreciables de estos elementos en las emanaciones volcánicas y que la cantidad que queda en el mar después de los procesos de meteorización y de la formación de los sedimentos es muy pequeña.

Los elementos Hf, Lu, Tb, Y, Yb, Zr y Ce en sedimentos activos de corriente, presentan una distribución geoquímica similar (ver en anexos, figuras A2.1-A2.7), donde las concentraciones son del orden de 0.05-0.36 ppm, 0.01-0.23 ppm, 0.24-0.54 ppm, 2.57-20 ppm, 0.1-1.7 ppm, 0.6-22.2 ppm y 6.25-52.3 ppm; respectivamente. Siendo los elementos más abundantes el Ce y el Zr, mientras que el lutecio es el menos abundante.

Otras tendencias de distribución geoquímica estuvieron definidas por los siguientes grupos de elementos: Ga, Al, Co, La, Rb, Th, Mn, Sc y V (ver en anexos, figuras A2.8-A2.16), cuyas concentraciones son de 2.5-15 ppm, 0.61-5.28%, 3-37.7 ppm, 3.9-27.9 ppm, 3.2-50.4 ppm, 0.7-11.4 ppm, 109-2635 ppm, 1.9-13.8 ppm y 6-400 ppm; respectivamente. Se consideraron al aluminio y al manganeso (los que no son elementos traza), debido a que presentan una distribución similar a la de los elementos traza mencionados anteriormente, sin considerar a estos elementos; las más altas concentraciones las presentaron el V y el Rb, mientras que el Th resultó ser el más escaso.

De los 16 elementos mencionados, todos los lantánidos presentan una distribución normal en sus abundancias, mientras que los elementos restantes, muestran una distribución log-normal en sus concentraciones.

La distribución geoquímica de los elementos en estudio se analizó mediante la elaboración de mapas isovalóricos, mediante el método de interpolación espacial denominado de mínima curvatura, utilizando el módulo Chimera del software Geosoft. El método de interpolación espacial de mínima curvatura trata de producir una superficie continua de mínima curvatura sobre la cual todos los puntos de observación están anclados. Superficies aún menos curvadas son por ejemplo las superficies de tendencia basadas en una regresión polinomial de mínimos cuadrados o bien las superficies planas producidas por las redes triangulares: RTI. Sin embargo, las superficies de tendencia no tratan de reproducir los valores observados con exactitud, razón por la cual Laslett et al. (1987) no los considera como procedimientos de interpolación *strictu sensu*; mientras que las superficies en RTI no son superficies con continuidad matemática.

El método de la mínima curvatura es de algún modo un método híbrido puesto que realiza primero una interpolación global, pero a continuación acerca las estimaciones a través de un proceso iterativo que toma en cuenta los residuos locales. De esta forma se puede analizar la distribución geoquímica, realizando mapas isovalóricos de los diferentes elementos en estudio y de aquellos que de acuerdo a la estadística bivarial, multivarial y sus trenes de dispersión presentan tendencias similares en cuanto a su distribución geoquímica.

7.5 ANOMALÍAS GEOQUÍMICAS

Para la determinación de las anomalías geoquímicas, primero se calcularon los valores del threshold para cada elemento estudiado, de acuerdo a la fórmula que postuló Sinclair (threshold igual al background mas dos veces la desviación estándar), considerando a la media geométrica como valor de fondo (background). El grado de intensidad de cada anomalía se determinó en función al threshold, de manera que se consideran anomalías débiles (de 1 a 2 veces el threshold), anomalías moderadas (de 2 a 3 veces el threshold), anomalías fuertes (de 3 a 4 veces el threshold) y anomalías muy fuertes (más de 4 veces el threshold).

En la tabla 28 se presentan las anomalías de los elementos lantánidos estudiados.

DISPERSIÓN GEOQUÍMICA SECUNDARIA DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS LANTÁNIDOS EN LA CUENCA DE LOS RÍOS CHANCAY-LAMBAYEQUE

La denominación de las anomalías se asignaron de acuerdo al nombre de la quebrada donde se ha tomado la muestra y, a falta de nombre de la quebrada, se le denomina según la localidad donde se ubica la anomalía, además se consigna información relativa a la ubicación de las anomalías, el área que involucra la muestra, la distribución de áreas de cada unidad geológica, la relación con alguna ocurrencia minera conocida, así como los elementos anómalos con sus respectivas concentraciones, ver tabla 28.

En el mapa N° 3 se muestran las ubicaciones de las muestras anómalas así como sus respectivas áreas de aporte tanto para los elementos lantánidos como para los principales elementos de interés económicos (Au, Ag, Sb, As, Hg, Cu, Mo, Pb, Zn, Cd, V, Co, Ni, Cr, W y U).

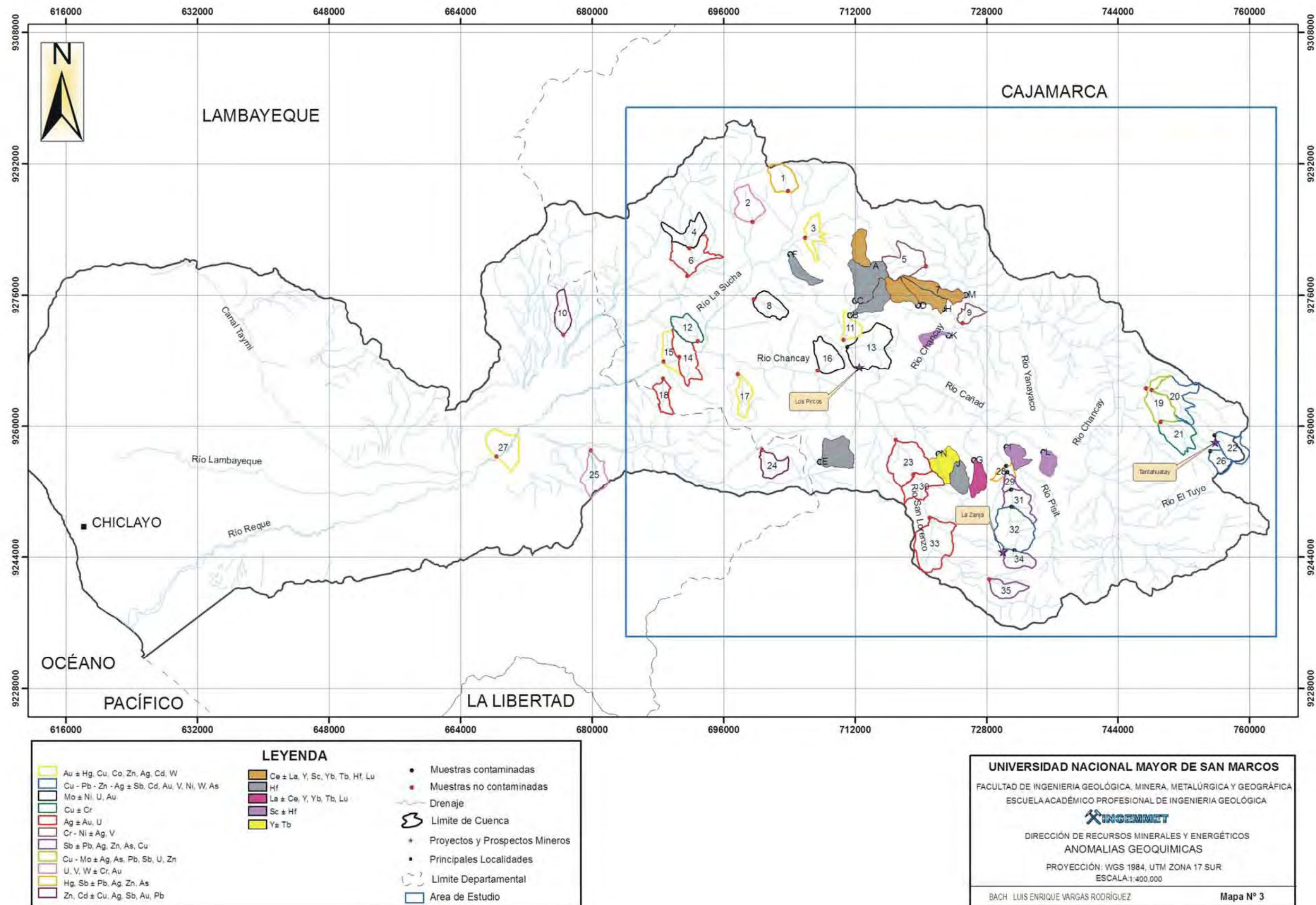


Tabla Nº 28 Anomalías Geoquímicas-Elementos Lantánidos

Id	Anomalía	Código de Muestra	Coordenadas		Área (Km ²)	Litotipo Predom.**	(%)	Distribución Areal de Unidades Geológicas (Km ²)	Ocurrencia Mineral	Asociación Geoquímica	Concentraciones (ppm)
			Norte	Este							
A	LA COLMENA	14e-002	9279536	713821	7.13	Toba Ácida	65	Fm. Huambos: 7.13.	-	Ce (La)	46.2 (26.9)
B	POTRERILLO	14e-006	9273521	711339	8.47	Toba Ácida	40	Fm. Huambos: 4.40, Llama: 4.07.	-	Hf	0.34
C	SAN JOSE	14e-012	9275330	711946	15.35	Toba Ácida	40	Fm. Huambos: 8.90, Llama: 6.45.	-	Hf	0.34
D	MARAPAMPA 1	14e-015	9274786	719613	7.65	Toba Ácida	100	Fm. Huambos: 7.65.	-	Ce (La, Hf)	42.5 (25.7, 0.34)
E	MARAMAYO	14e-056	9255716	707663	12.38	Toba Ácida	60	Fm. Huambos: 12.38.	-	Hf	0.44
F	CHAUNA	14e-137	9280979	704058	5.26	Toba Ácida	50	Fm. Llama: 5.26.	-	Hf	0.36
G	SUCCHUPAMPA	14f-126	9255905	726416	6.08	Toba Ácida	65	Fm. Huambos: 6.08.	-	La (Ce, Y, Yb, Tb, Lu)	52.7 (52.3, 28.9, 1.7, 1.04, 0.23)
H	MARAPAMPA 2	14f-127	9274344	722627	8.05	Toba Ácida	100	Fm. Huambos: 8.05.	-	Ce (La, Hf)	44.5 (27.9, 0.35)
I	HUALANGA 2	14f-134	9257454	730419	5.66	Toba Ácida	65	Fm. Llama: 5.66.	-	Sc (Hf)	13.8 (0.35)
J	CHILAL	14f-137	9255480	723985	6.90	Toba Ácida	50	Fm. Huambos: 6.90.	-	Hf	0.36
K	MOTUPE	14f-140	9271078	723319	3.55	Toba Ácida	50	Fm. Huambos: 3.55.	-	Sc	10.5
L	SAN JUAN DE DIOS	14f-164	9256886	734849	5.08	Toba Ácida	75	Fm. Llama: 5.08.	-	Sc	11.2
M	HUAMBOYACO 2	14f-165	9276078	725410	7.50	Toba Ácida	85	Fm. Huambos: 7.50.	-	Ce (La, Y, Sc, Yb, Tb, Hf, Lu)	56.7 (36.2, 30.8, 22.8, 2.5, 0.99, 0.55, 0.35)
N	MOYUPANA	14f-173	9256677	722111	9.07	Toba Ácida	50	Fm. Huambos: 9.07.	-	Y, (Tb)	18.8 (0.68)

*

Concentraciones de Au en ppb.

** Según la predominancia litológica de la fracción granulométrica retenida en la malla 30.

CONCLUSIONES

- Del procesamiento estadístico se demuestra que las distribuciones geoquímicas de los elementos lantánidos estudiados son similares, salvo el caso del Sc, confirmándose así la gran afinidad geoquímica existente entre ellos, en sedimentos activos de corriente cuya unidad de aporte correspondió a un ambiente primario de vulcanismo continental. El 67.85% de los coeficientes de Pearson obtenidos entre los elementos lantánidos presentan una correlación superior a +0.60.
- Del aseguramiento y control de calidad se comprobó que los resultados analíticos se encuentran dentro de los rangos aceptables, validando de esta manera los resultados analíticos de la totalidad de muestras.
- Dentro de los 7 elementos considerados en el subgrupo de los lantánidos, el Sc mostró tener un comportamiento geoquímico diferente al resto de elementos de este subgrupo debido a que éste presenta una configuración electrónica diferente y un radio iónico significativamente menor. Por lo que decimos que para sedimentos activos de corriente cuya fuente primaria correspondió a un ambiente primario de vulcanismo continental, el escandio no presenta una afinidad geoquímica considerable con los lantánidos.
- Mediante la aplicación de un análisis de componentes principales, es posible encontrar “asociaciones naturales” entre los datos de las múltiples variables estudiadas o la existencia de patrones comunes de agrupamiento dentro de los mismos, allí radica su gran utilidad ya que definen asociaciones geoquímicas características.
- La óptima caracterización de los patrones de dispersión secundaria, nos permite conocer el comportamiento de elementos que no forman minerales reconocibles en dichos patrones o que son absorbidos por otros minerales. Además nos permite prospectar grandes áreas de forma rápida, debido al conocimiento de las distancias o áreas de influencia óptimas de muestreo.
- Los siguientes grupos de elementos mostraron patrones de dispersión similares en sedimentos activos de corriente: La-Ce-Rb y de manera opuesta el Cu; Yb-Hf-Lu-Tb; Sc-Y-Co-Ga-Zr-Al-V. Todos ellos en el sector la Zanja Este con valores de pH ligeramente alcalinos.

- En el sector La Zanja Oeste, los siguientes grupos de elementos traza presentaron patrones de dispersión geoquímica secundaria: La-Ce-Rb-Y-As; Tb-Yb, bajo condiciones de pH ligeramente alcalino.
- Las asociaciones geoquímicas, características en este tipo de ambiente geoquímico, determinadas en sedimentos activos de corriente son en orden de importancia:
 - Asociación Geoquímica 1: Y-Yb-Tb-Lu-U-Ce-Be-Th-La-Rb.
 - Asociación Geoquímica 2: Pb-As-Sb-Tl-Ag-Bi-Zn-Mo-In-Cd.
 - Asociación Geoquímica 3: Ga-Sc-Co-V-Mn.
 - Asociación Geoquímica 4: Ba-La.
 - Asociación Geoquímica 5: Cr-Ni.
- El Cu, P, Zr y Hf se presentan con un comportamiento geoquímico opuesto en su distribución, con respecto a las asociaciones geoquímicas 1 y 2.
- Las anomalías geoquímicas de los elementos lantánidos, reflejan las principales asociaciones geoquímicas, como es el caso de las anomalías:
 - Succhupampa y Huamboyo 2, para el caso de la asociación Geoquímica 1.
 - El Sillón, para el caso de la asociación geoquímica 2.
 - Palomita, para el caso de la asociación geoquímica 5.
- Los elementos pathfinder determinados a través del análisis de los patrones de dispersión y del análisis de componentes principales son:

<u>Elemento</u>	<u>Pathfinder</u>
La, Ce.	Rb.
Yb, Lu y Tb.	Hf.
Y, Sc.	Co, Ga, Zr, Al y V.

- En sedimentos activos de corriente, los elementos: Hf, Lu, Tb, Y, Yb, Zr y Ce presentan una misma tendencia en sus distribuciones geoquímicas. Otra tendencia de distribución geoquímica estuvo definida por los siguientes elementos: Ga, Al, Co, La, Rb, Th, Mn, Sc y V.
- Es evidente que actualmente las ciencias de la tierra necesitan una mayor incidencia en investigaciones que obtengan resultados cuantitativos y con un buen sustento estadístico como es el caso de la presente tesis.

RECOMENDACIONES

- Es necesario continuar con la caracterización geoquímica de la distribución y dispersión de los elementos lantánidos en otros ambientes geoquímicos, para así determinar los ambientes donde dichos elementos sean más abundantes e interesantes desde el punto de vista económico y ambiental.
- Se recomienda llevar una buena práctica de los protocolos de trabajo, en todas las fases del mismo.
- Se sugiere tener mucho cuidado y criterio en la elección de procedimientos estadísticos, puesto que una mala elección de éstos, aún acompañados de una buena información geológica podría conducirnos a realizar interpretaciones erradas.
- Es pertinente realizar estudios de dispersión geoquímica primaria en los diferentes ambientes geológicos, para poder establecer los patrones de distribución de dichos elementos bajo condiciones geoquímicas primarias y poder compararlos con los patrones de dispersión secundaria, quizá ambos guarden relaciones interesantes.
- Antes de realizar cualquier interpretación con los resultados analíticos se recomienda la validación de los mismos, a través de un riguroso control de calidad.
- A fin de no perder las fracciones más finas de sedimento durante el muestreo es importante emplear soluciones floculantes.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARMOUR-BROWN, A. & NICHOL, I. (1970): Regional geochemical reconnaissance and the location of metallogenic provinces. *Economic Geology*. Volumen 65. Nº 3. pp. 312-330.
2. BELLIDO, E. & DE MONTREUIL, L. (1972).- Aspectos Generales de la Metalogenia del Perú. Servicio de Geología y Minería. Boletín Nº 1. Serie B: Geología Económica. 149 p.
3. CANDIOTTI, H. & GUERRERO, T. (1997): Descubrimiento y Geología del Yacimiento de Oro Diseminado Sipán – Cajamarca, IX Congreso Peruano de Geología. Sociedad Geológica del Perú. Volumen Especial. Lima. pp. 9 – 13.
4. CATTELL, R. (1966): The Scree Test for the Number of Factors. *Multivariate Behavioral Research*. 1. pp. 245 -276.
5. CHIRA, J. et al (2006): Geoquímica ambiental de la cuenca del río Chancay-Lambayeque. INGEMMET. Boletín. Serie B: Geología Económica, Nº 15, 123 pp.
6. DICKINSON, J. & CHAKRABORTI, S. (2003): Nonparametric Statistical Inference. Editorial Marcel Dekker. Cuarta Edición. New York. pp. 130.
7. GARCÍA, B. et al (2005): Modelización de los factores más importantes que caracterizan un sitio en la red. XII Jornadas de ASEPUMA. Universidad de Murcia. 13 p.
8. GARCÍA, M. & IBAR, R. (2001): Análisis factorial de los componentes del IPC de la comunidad Canaria. Universidad San Pablo – CEU. Facultad de CC. Económicas y Empresariales. España. 14 p.
9. GUSTAFSON, L. et al. (2004): Porphyry-Epithermal transition, Cajamarca region, Northern Peru. En Society of Economic Geologists. Special Publication Nº 11 pp. 279-299.
10. HARMAN, H. (1967): Modern Factor Analysis. Universidad de Chicago Press. Segunda edición. 474 p.
11. HEDRICK, J. (200): U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2007.
12. INGEMMET (1995): Geología del Perú. Boletín Nº 55. Serie A: Carta Geológica Nacional. 177 p.
13. INGEMMET (2005): Procedimiento de Prospección Geoquímica de Sedimentos de Corriente. Dirección de Recursos Minerales y Energéticos. Protocolo interno. 6 p.
14. KAISER, H. (1958): The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, Nº 23, pp. 187-278.

15. KLEIN, T. et al (1997): San José sur - high sulfidation gold deposit Yanacocha district, northern Peru. IX Congreso Peruano de Geología. Resúmenes extendidos. Sociedad Geológica del Perú. Publicación Especial. Lima. pp. 57-60.
16. NOBLE, D. & MCKEE, E. (1997): The Miocene metallogenic belt of central and northern Peru. IX Congreso Peruano de Geología. Resúmenes extendidos. Sociedad Geológica del Perú. Publicación Especial. Lima. pp. 115-119.
17. NOBLE, D.; VIDAL, C.; PERELLO, J.; RODRÍGUEZ, O. (2004): Space-time relationships of some porphyry Cu-Au, epithermal Au, and other magmatic-related mineral deposits in northern Peru. Society of Economic Geologists, Special Publication, Nº 11. pp. 313-318.
18. PAZ, M. (1996): Potencial Minero de la Región Nor Oriental del Marañón. Primer Congreso Nacional de Minería. Cajamarca. 19 p.
19. PLÁ, R. (2003): Evaluación estadística de una matriz de datos utilizando el SPSS. ALCA. Curso regional validaciones de metodologías analíticas y métodos específicos. Asunción. 6 p.
20. RANKAMA, K. & SAHAMA, TH. (1949): Geoquímica. Ediciones Madrid. 862 p.
21. RIVERA, H. (2007): Introducción a la Geoquímica General y Aplicada. 2ª Edición. Lima. Perú. 475 pp.
22. SIEGEL, F (1992): Geoquímica Aplicada. Washington: Secretaría General de la OEA, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. 170 pp.
23. SINCLAIR, A. (1974): Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs. Journal of Geochemical Exploration. Vol. 3. pp. 129-149.
24. STEINMANN, G. (1930): Geología del Perú. Con contribuciones de R. Stappenbeck sobre yacimientos de minerales útiles; de F. Sieberg sobre los terremotos en el Perú y de C.I. Lisson en el Mapa Geológico. pp. 294-302.
25. STEINMULLER, K. (1999): Depósitos Metálicos en el Perú. Su metalogenia, sus modelos, su exploración y el medio ambiente. 171 p.
26. TANABE, H. & TURNER, S. (2000): La Zanja Prospecto Epitermal de Oro-Plata en la Franja de Volcánicos Terciarios del Norte Peruano. X Congreso Peruano de Geología. Sociedad Geológica del Perú. pp. 92.
27. TUMIALÁN, P. (2003): Compendio de yacimientos minerales del Perú. Boletín Nº 10. Serie B. Geología Económica. INGEMMET. 619 p.
28. TURNER, S. (1999): Settings and styles of high-sulphidation gold deposits in the Cajamarca region, northern Peru. PACRIM '99 Congress. Indonesia. pp. 461-468.
29. URIEL, E. (1995): Análisis de datos: Series temporales y análisis mutivariante. Editorial AC. Madrid. pp. 343.

30. VALDIVIA, J. & RODRÍGUEZ, O. (2004): Evolución genética de los yacimientos San Pedro Sur y Pampa Verde, Proyecto La Zanja. XII Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú. pp. 731-734.
31. VARGAS, L & CHIRA, J. (2006): Dispersión geoquímica de metales pesados en la cuenca alta y media de los ríos Chancay y Lambayeque-Cajamarca; implicancias ambientales. XIII Congreso Peruano de Geología. Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú, pp. 231-234.
32. VIDAL, C. & CABOS, R. (1983): Zonamiento regional de las alteraciones y menas hidrotermales en Hualgayoc, Cajamarca. Sociedad Geológica del Perú. Boletín. N° 71. pp. 117-120.
33. VIDAL, C. (2001): Diatremas estructuralmente alineadas con alteración argílica avanzada y mineralización epitermal de óxidos auríferos en el proyecto Tantahuatay, Cajamarca. ProExplo. Lima. 4 p.
34. WILSON, J. (1984): Geología de los Cuadrángulos de Jayanca, Incahuasi, Cutervo, Chiclayo, Chongoyape, Chota, Celendín, Pacasmayo y Chepen. INGEMMET. Boletín N° 38 Serie A: Carta Geológica Nacional. 104 p.

ANEXOS

ANEXO 1 RESULTADOS DEL ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE LA CALIDAD

Tabla A1.1 Parámetros de Precisión en muestras de Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Ce)

Muestra	Límite de Detección (ppm)	Valores Obtenidos (ppm)	Valor Promedio (ppm)	S.D (ppm)	Tolerancia Permisible* (%)	Límite Mínimo Permisible (ppm)	Límite Máximo Permisible (ppm)
13e-008	0.05	21.90	21.900	0.000	10.00	19.710	24.090
13e-048		21.90					
13e-035	0.05	25.70	26.850	1.626	10.00	24.165	29.535
13e-049		28.00					
14e-024	0.05	23.30	23.700	0.566	10.00	21.330	26.070
14e-046		24.10					
14e-038	0.05	23.90	24.500	0.849	10.00	22.050	26.950
14e-045		25.10					
14e-109	0.05	8.90	8.160	2.744	10.00	7.344	8.976
14e-177		7.42					
14e-124	0.05	13.30	15.350	2.899	10.00	13.815	16.885
14e-176		17.40					
14e-152	0.05	27.50	25.850	2.333	10.00	23.265	28.435
14e-173		24.20					
14e-154	0.05	22.60	22.300	0.424	10.00	20.070	24.530
14e-175		22.00					
14e-174	0.05	18.30	19.950	2.333	10.00	17.955	21.945
14e-064		21.60					
14f-029	0.05	23.80	22.900	1.273	10.00	20.610	25.190
14f-099		22.00					
14f-090	0.05	20.50	22.250	2.475	10.00	20.025	24.475
14f-100		24.00					
14f-118	0.05	27.00	26.800	0.283	10.00	24.120	29.480
14f-177		26.60					
14f-146	0.05	24.00	23.050	1.344	10.00	20.745	25.355
14f-175		22.10					

(*)Tolerancia Permisible determinada según el método analítico, ataque húmedo y límite de detección. Expresada en (%) y referida al Valor Promedio.

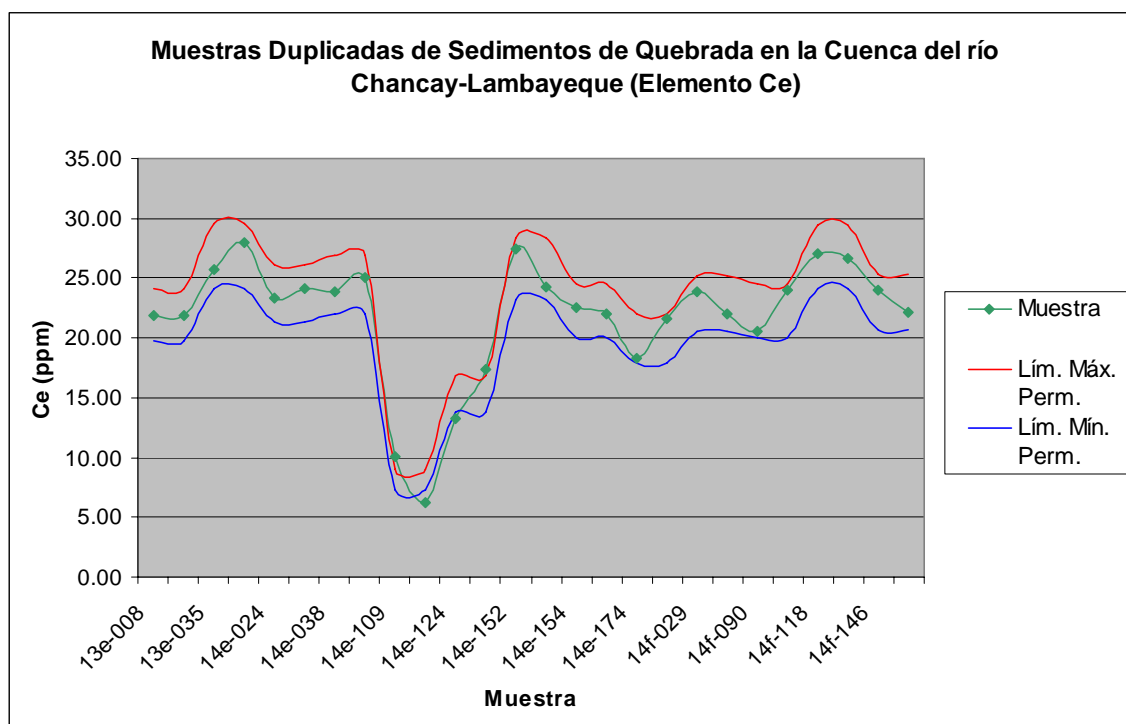


Figura A1.1 Variabilidad de la precisión en muestras duplicadas-Elemento Ce

Tabla A1.2 Parámetros de Precisión en muestras de Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Tb)

Muestra	Límite de Detección (ppm)	Valores Obtenidos (ppm)	Valor Promedio (ppm)	S.D (ppm)	Tolerancia Permisible* (%)	Límite Mínimo Permisible (ppm)	Límite Máximo Permisible (ppm)
13e-008 13e-048	0.02	0.39 0.37	0.380	0.014	20.00	0.304	0.456
13e-035 13e-049	0.02	0.41 0.44	0.425	0.021	20.00	0.340	0.510
14e-024 14e-046	0.02	0.38 0.40	0.390	0.014	20.00	0.312	0.468
14e-038 14e-045	0.02	0.39 0.42	0.405	0.021	20.00	0.324	0.486
14e-109 14e-177	0.02	0.24 0.19	0.215	0.035	20.00	0.172	0.258
14e-124 14e-176	0.02	0.27 0.32	0.295	0.035	20.00	0.236	0.354
14e-152 14e-173	0.02	0.47 0.41	0.440	0.042	20.00	0.352	0.528
14e-154 14e-175	0.02	0.43 0.40	0.415	0.021	20.00	0.332	0.498
14e-174 14e-064	0.02	0.32 0.33	0.325	0.007	20.00	0.260	0.390
14f-029 14f-099	0.02	0.36 0.43	0.395	0.049	20.00	0.316	0.474
14f-090 14f-100	0.02	0.29 0.34	0.315	0.035	20.00	0.252	0.378
14f-118 14f-177	0.02	0.48 0.50	0.490	0.014	20.00	0.392	0.588
14f-146 14f-175	0.02	0.48 0.45	0.465	0.021	20.00	0.372	0.558

(*)Tolerancia Permisible determinada según el método analítico, ataque húmedo y límite de detección. Expresada en (%) y referida al Valor Promedio.

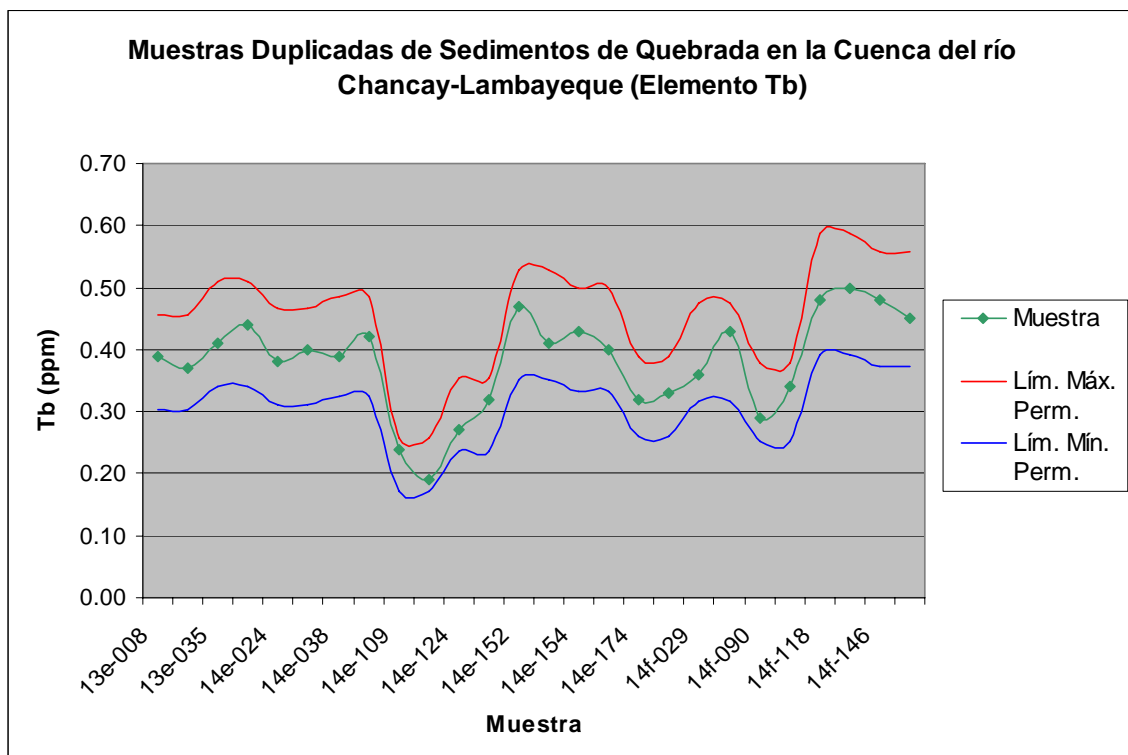


Figura A1.2 Variabilidad de la precisión en muestras duplicadas-Elemento Tb

Tabla A1.3 Parámetros de Precisión en muestras de Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Yb)

Muestra	Límite de Detección (ppm)	Valores Obtenidos (ppm)	Valor Promedio (ppm)	S.D (ppm)	Tolerancia Permisible* (%)	Límite Mínimo Permisible (ppm)	Límite Máximo Permisible (ppm)
13e-008 13e-048	0.20	1.00 1.00	1.000	0.000	30.00	0.700	1.300
13e-035 13e-049	0.20	1.20 1.10	1.150	0.071	20.00	0.920	1.380
14e-024 14e-046	0.20	1.00 1.00	1.000	0.000	30.00	0.700	1.300
14e-038 14e-045	0.20	1.10 1.00	1.050	0.071	20.00	0.840	1.260
14e-109 14e-177	0.20	0.40 0.40	0.400	0.000	0.2 ppm	0.200	0.600
14e-124 14e-176	0.20	0.50 0.60	0.550	0.071	30.00	0.385	0.715
14e-152 14e-173	0.20	1.20 1.00	1.100	0.141	20.00	0.880	1.320
14e-154 14e-175	0.20	1.00 0.90	0.950	0.071	30.00	0.665	1.235
14e-174 14e-064	0.20	0.70 0.80	0.750	0.071	30.00	0.525	0.975
14f-029 14f-099	0.20	0.90 0.90	0.900	0.000	30.00	0.630	1.170
14f-090 14f-100	0.20	0.70 0.70	0.700	0.000	30.00	0.490	0.910
14f-118 14f-177	0.20	1.30 1.30	1.300	0.000	20.00	1.040	1.560
14f-146 14f-175	0.20	1.30 1.20	1.250	0.071	20.00	1.000	1.500

(*)Tolerancia Permisible determinada según el método analítico, ataque húmedo y límite de detección. Donde la Tolerancia Permisible sin unidades está expresada en (%) y referida al Valor Promedio.

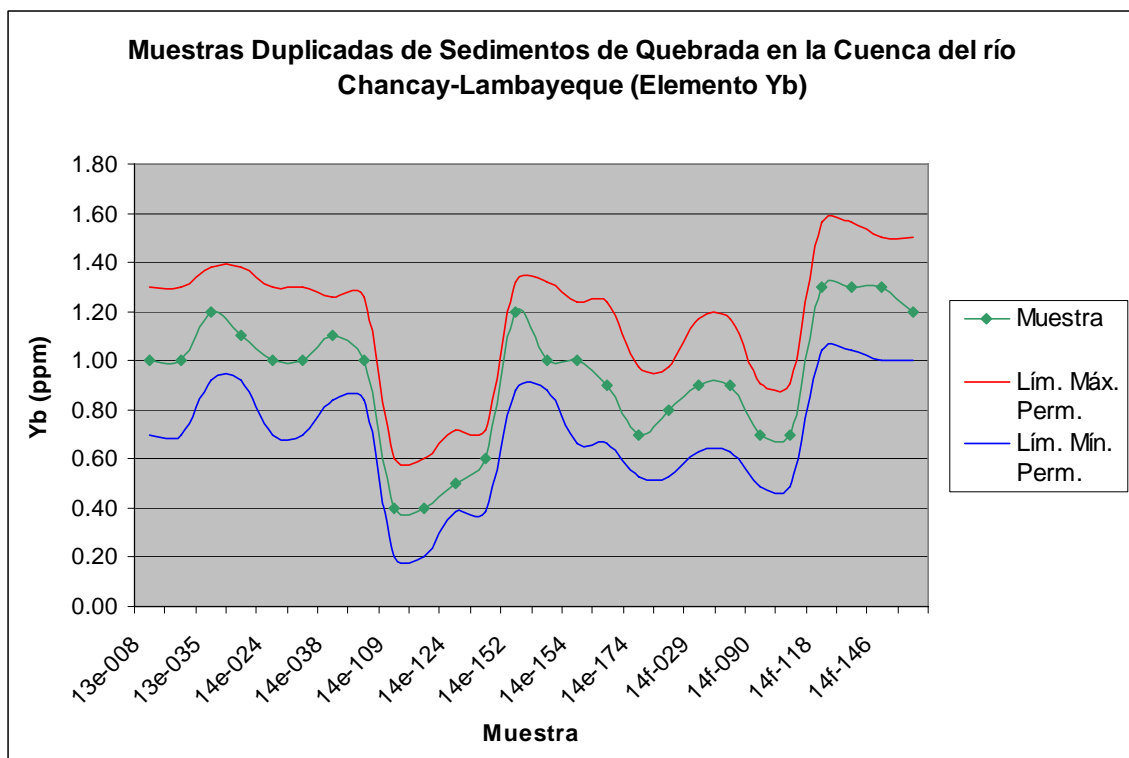


Figura A1.3 Variabilidad de la precisión en muestras duplicadas-Elemento Yb

Tabla A1.4 Parámetros de Precisión en muestras de Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Lu).

Muestra	Límite de Detección (ppm)	Valores Obtenidos (ppm)	Valor Promedio (ppm)	S.D (ppm)	Tolerancia Permisible* (%)	Límite Mínimo Permisible (ppm)	Límite Máximo Permisible (ppm)
13e-008 13e-048	0.01	0.13 0.12	0.125	0.007	20.00	0.100	0.150
13e-035 13e-049	0.01	0.13 0.13	0.130	0.000	20.00	0.104	0.156
14e-024 14e-046	0.01	0.12 0.13	0.125	0.007	20.00	0.100	0.150
14e-038 14e-045	0.01	0.13 0.13	0.130	0.000	20.00	0.104	0.156
14e-109 14e-177	0.01	0.05 0.04	0.045	0.007	30.00	0.032	0.059
14e-124 14e-176	0.01	0.06 0.07	0.065	0.007	30.00	0.046	0.085
14e-152 14e-173	0.01	0.14 0.13	0.135	0.007	20.00	0.108	0.162
14e-154 14e-175	0.01	0.11 0.11	0.110	0.000	20.00	0.088	0.132
14e-174 14e-064	0.01	0.09 0.09	0.090	0.000	30.00	0.063	0.117
14f-029 14f-099	0.01	0.11 0.18	0.145	0.049	20.00	0.116	0.174
14f-090 14f-100	0.01	0.09 0.10	0.095	0.007	30.00	0.067	0.124
14f-118 14f-177	0.01	0.17 0.17	0.170	0.000	20.00	0.136	0.204
14f-146 14f-175	0.01	0.17 0.16	0.165	0.007	20.00	0.132	0.198

(*)Tolerancia Permisible determinada según el método analítico, ataque húmedo y límite de detección. Expresada en (%) y referida al Valor Promedio.

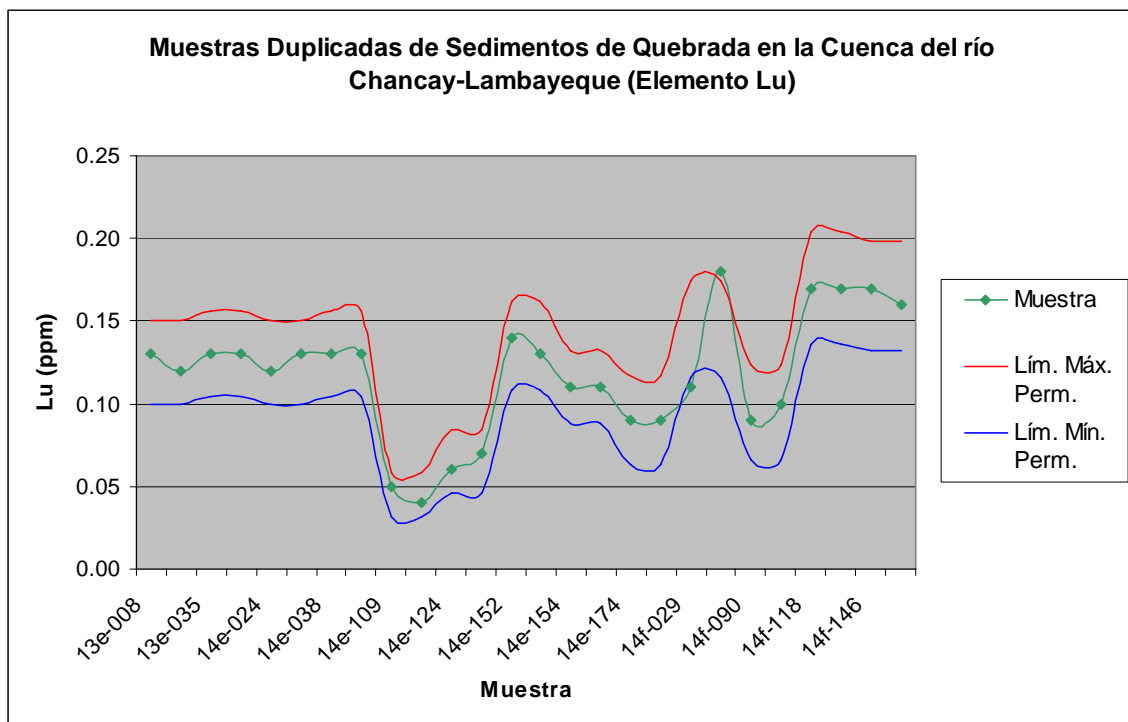


Figura A1.4 Variabilidad de la precisión en muestras duplicadas-Elemento Lu

Tabla A1.5 Parámetros de Precisión en muestras de Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Sc).

Muestra	Límite de Detección (ppm)	Valores Obtenidos (ppm)	Valor Promedio (ppm)	S.D (ppm)	Tolerancia Permisible* (%)	Límite Mínimo Permisible (ppm)	Límite Máximo Permisible (ppm)
13e-008 13e-048	0.10	7.90 7.00	7.450	0.636	20.00	5.960	8.940
13e-035 13e-049	0.10	8.40 8.40	8.400	0.000	20.00	6.720	10.080
14e-024 14e-046	0.10	5.60 5.10	5.350	0.354	20.00	4.280	6.420
14e-038 14e-045	0.10	5.50 5.90	5.700	0.283	20.00	4.560	6.840
14e-109 14e-177	0.10	3.20 2.90	3.050	0.212	20.00	2.440	3.660
14e-124 14e-176	0.10	3.70 4.60	4.150	0.636	20.00	3.320	4.980
14e-152 14e-173	0.10	6.70 5.30	6.000	0.990	20.00	4.800	7.200
14e-154 14e-175	0.10	5.40 5.00	5.200	0.283	20.00	4.160	6.240
14e-174 14e-064	0.10	4.10 4.30	4.200	0.141	20.00	3.360	5.040
14f-029 14f-099	0.10	5.00 6.40	5.700	0.990	20.00	4.560	6.840
14f-090 14f-100	0.10	5.00 6.30	5.650	0.919	20.00	4.520	6.780
14f-118 14f-177	0.10	11.60 12.00	11.800	0.283	10.00	10.620	12.980
14f-146 14f-175	0.10	12.30 10.80	11.550	1.061	10.00	10.395	12.705

(*)Tolerancia Permisible determinada según el método analítico, ataque húmedo y límite de detección. Expresada en (%) y referida al Valor Promedio.

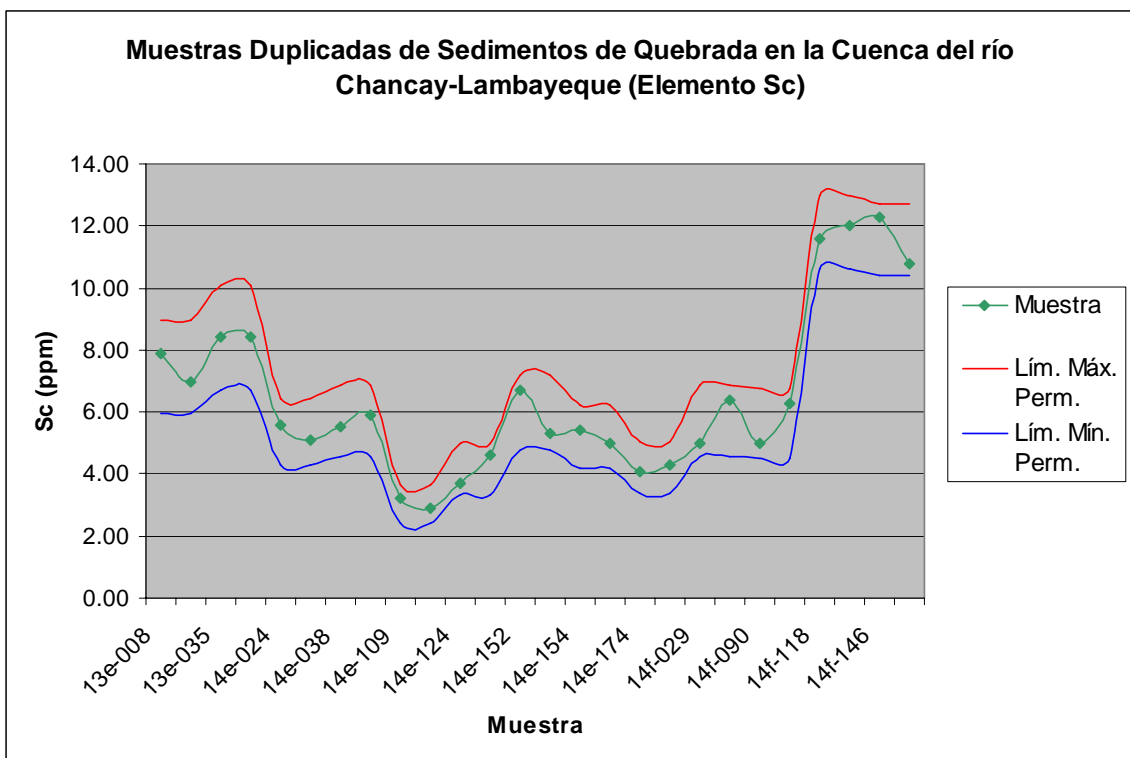


Figura A1.5 Variabilidad de la precisión en muestras duplicadas-Elemento Sc

Tabla A1.6 Parámetros de Precisión en muestras de Sedimentos de Quebrada en la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Y).

Muestra	Límite de Detección (ppm)	Valores Obtenidos (ppm)	Valor Promedio (ppm)	S.D (ppm)	Tolerancia Permisible* (%)	Límite Mínimo Permisible (ppm)	Límite Máximo Permisible (ppm)
13e-008 13e-048	0.05	11.90 11.10	11.500	0.566	10.00	10.350	12.650
13e-035 13e-049	0.05	12.60 12.90	12.750	0.212	10.00	11.475	14.025
14e-024 14e-046	0.05	12.20 12.10	12.150	0.071	10.00	10.935	13.365
14e-038 14e-045	0.05	12.50 12.10	12.300	0.283	10.00	11.070	13.530
14e-109 14e-177	0.05	5.25 4.70	4.975	0.389	10.00	4.478	5.473
14e-124 14e-176	0.05	6.23 7.09	6.660	0.608	10.00	5.994	7.326
14e-152 14e-173	0.05	13.90 11.70	12.800	1.556	10.00	11.520	14.080
14e-154 14e-175	0.05	13.10 11.50	12.300	1.131	10.00	11.070	13.530
14e-174 14e-064	0.05	8.94 9.19	9.065	0.177	10.00	8.159	9.972
14f-029 14f-099	0.05	9.52 10.30	9.910	0.552	10.00	8.919	10.901
14f-090 14f-100	0.05	8.13 8.52	8.325	0.276	10.00	7.493	9.158
14f-118 14f-177	0.05	14.40 14.40	14.400	0.000	10.00	12.960	15.840
14f-146 14f-175	0.05	13.80 13.70	13.750	0.071	10.00	12.375	15.125

(*)Tolerancia Permisible determinada según el método analítico, ataque húmedo y límite de detección. Expresada en (%) y referida al Valor Promedio.

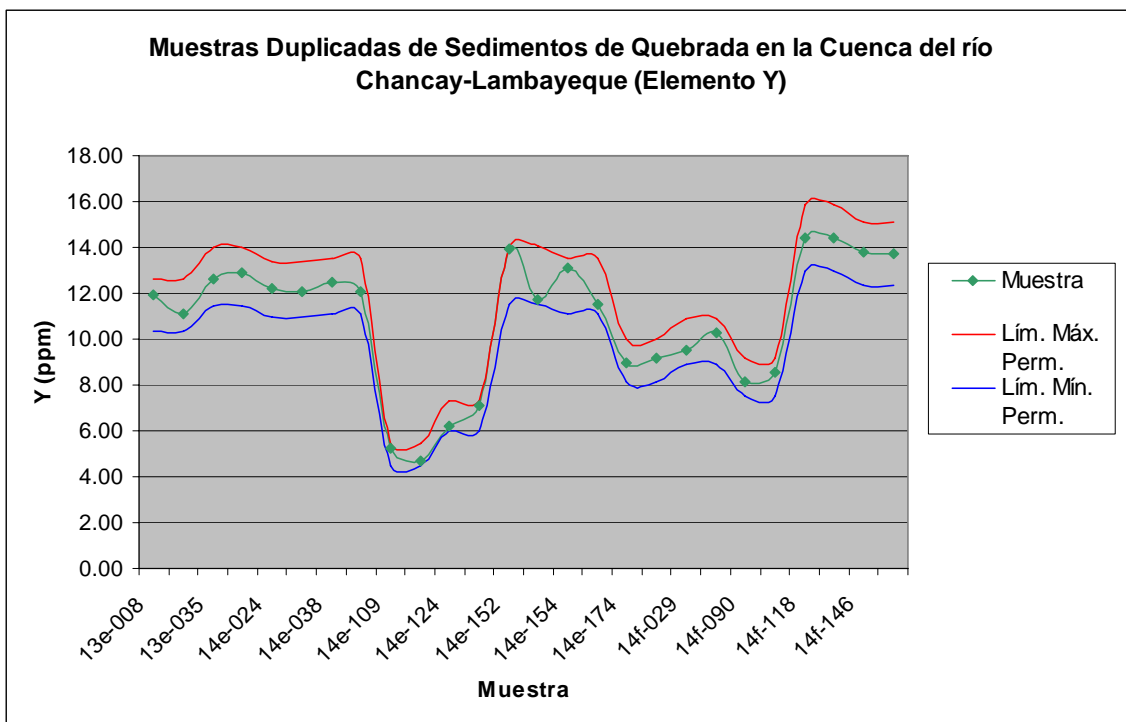


Figura A1.6 Variabilidad de la precisión en muestras duplicadas-Elemento Y

Tabla A1.7 Parámetros de Exactitud en Muestras "Estándares" para Sedimentos de Quebrada de la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Pb)

Muestra	Límite de Detección (ppm)	Valores Obtenidos (ppm)	Valor Promedio (ppm)	S.D (ppm)	Límite Mínimo Permisible* (ppm)	Límite Máximo Permisible* (ppm)
14e-100	0.20	7.70	14.00	7.00	0.00	28.00
14e-080	0.20	7.40	14.00	7.00	0.00	28.00
14f-010	0.20	34.40	69.00	18.00	33.00	105.00
13e-030	0.20	39.00	69.00	18.00	33.00	105.00
13e-010	0.20	40.60	49.00	4.00	41.00	57.00
14f-120	0.20	7.40	14.00	7.00	0.00	28.00
14e-010	0.20	8.00	14.00	7.00	0.00	28.00

* Límites Permisibles establecidos según la relación: Valor Promedio +/- 2S.D

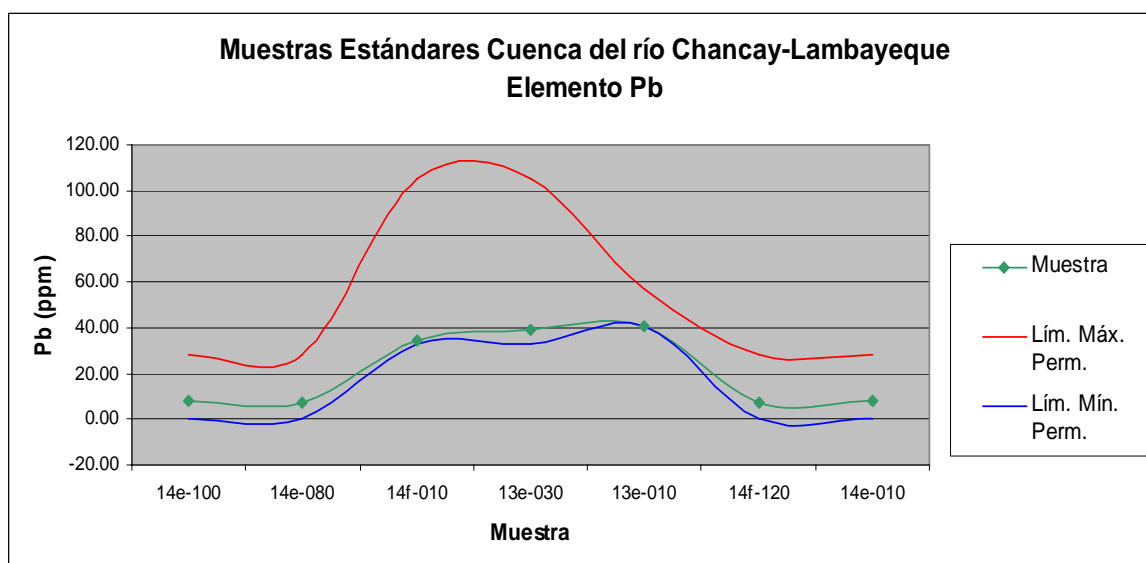


Figura A1.7 Patrones de exactitud en muestras estándares-Elemento Pb

Tabla A1.8 Parámetros de Exactitud en Muestras "Estándares" para Sedimentos de Quebrada de la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Zn)

Muestra	Límite de Detección (ppm)	Valores Obtenidos (ppm)	Valor Promedio (ppm)	S.D (ppm)	Límite Mínimo Permisible (ppm)	Límite Máximo Permisible (ppm)
14e-100	1.00	58.00	86.00	17.00	52.00	120.00
14e-080	1.00	55.00	86.00	17.00	52.00	120.00
14f-010	1.00	27.00	31.00	4.00	23.00	39.00
13e-030	1.00	25.00	31.00	4.00	23.00	39.00
13e-010	1.00	576.00	677.00	42.00	593.00	761.00
14f-120	1.00	57.00	86.00	17.00	52.00	120.00
14e-010	1.00	62.00	86.00	17.00	52.00	120.00

* Límites Permisibles establecidos según la relación: Valor Promedio +/- 2S.D

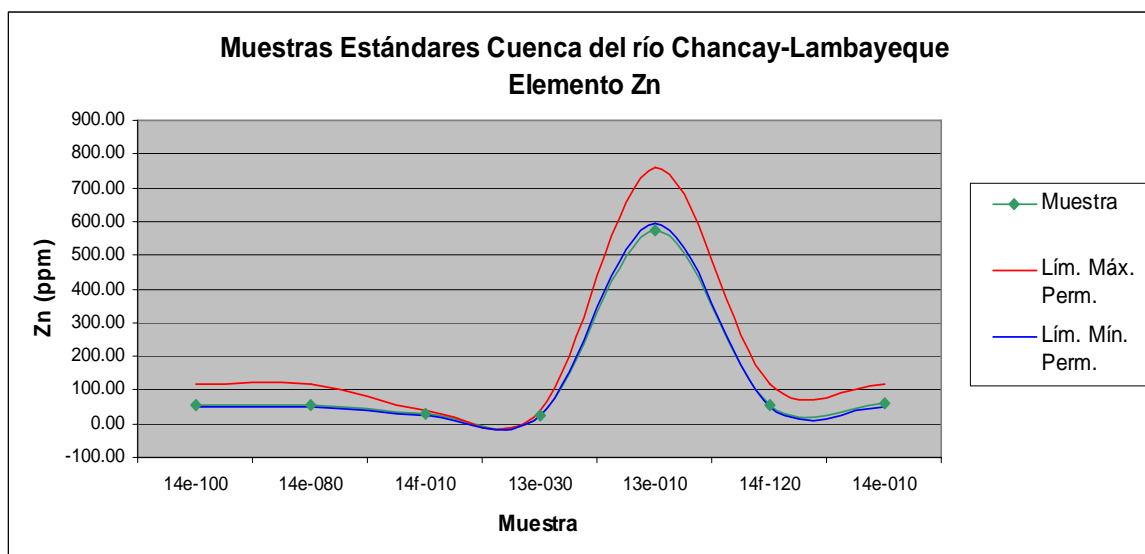


Figura A1.8 Patrones de exactitud en muestras estándares-Elemento Zn

Tabla A1.9 Parámetros de Exactitud en Muestras "Estándares" para Sedimentos de Quebrada de la Cuenca del río Chancay-Lambayeque (Elemento Ni)

Muestra	Límite de Detección (ppm)	Valores Obtenidos (ppm)	Valor Promedio (ppm)	S.D (ppm)	Límite Mínimo Permisible (ppm)	Límite Máximo Permisible (ppm)
14e-100	0.50	91.00	120.00	28.00	64.00	176.00
14e-080	0.50	89.80	120.00	28.00	64.00	176.00
14f-010	0.50	30.90	32.00	4.00	24.00	40.00
13e-030	0.50	28.30	32.00	4.00	24.00	40.00
13e-010	0.50	18.80	21.00	5.00	11.00	31.00
14f-120	0.50	105.00	120.00	28.00	64.00	176.00
14e-010	0.50	89.20	120.00	28.00	64.00	176.00

* Límites Permisibles establecidos según la relación: Valor Promedio +/- 2S.D

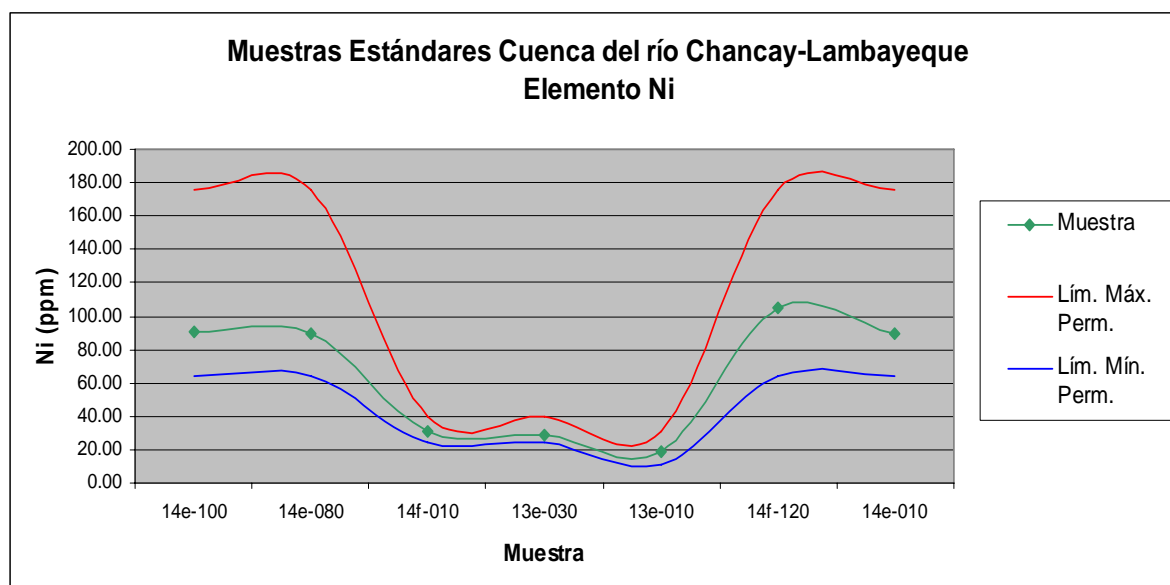


Figura A1.9 Patrones de exactitud en muestras estándares-Elemento Ni

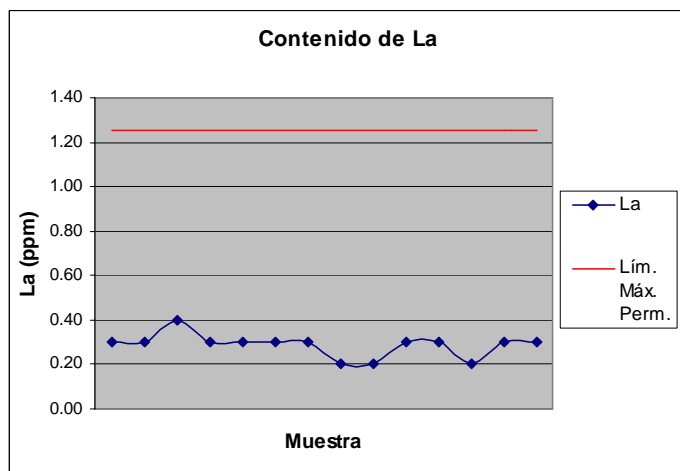


Figura A1.10 Niveles de La en muestras blanco

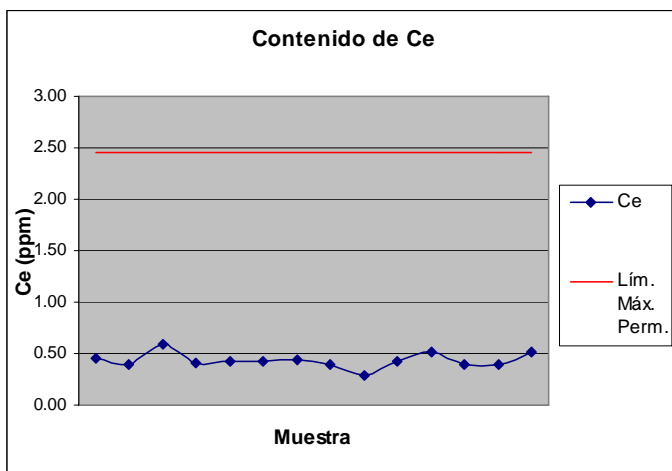


Figura A1.11 Niveles de Ce en muestras blanco

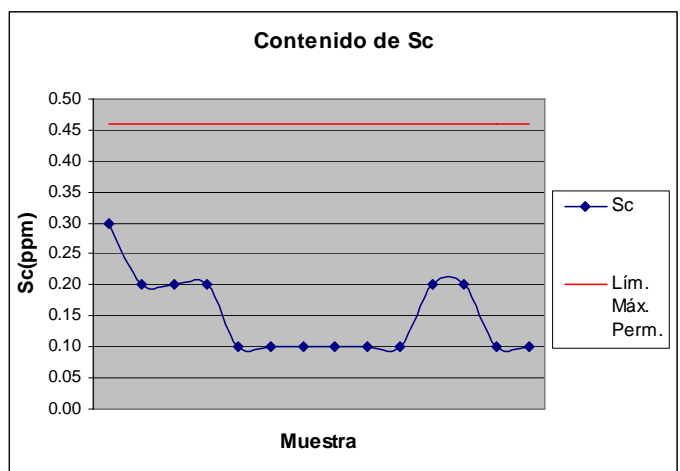


Figura A1.12 Niveles de Sc en muestras blanco

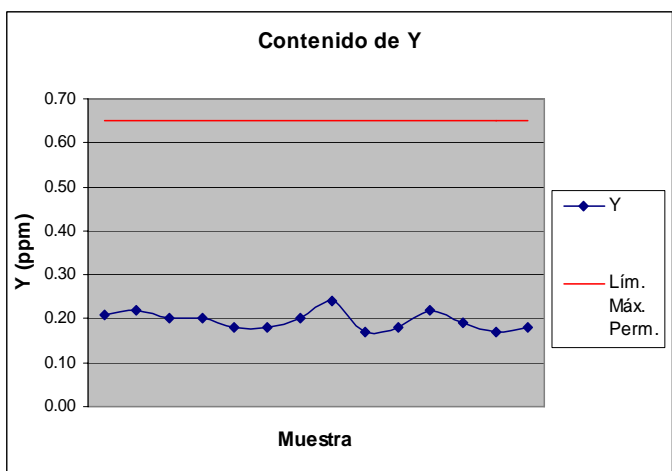


Figura A1.13 Niveles de Y en muestras blanco

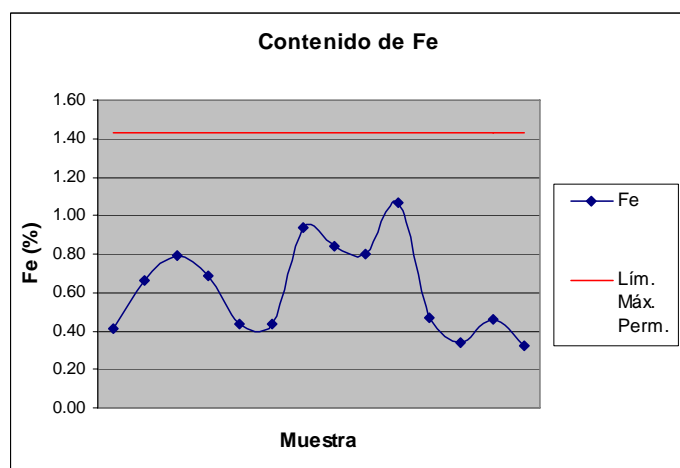


Figura A1.14 Niveles de Fe en muestras blanco

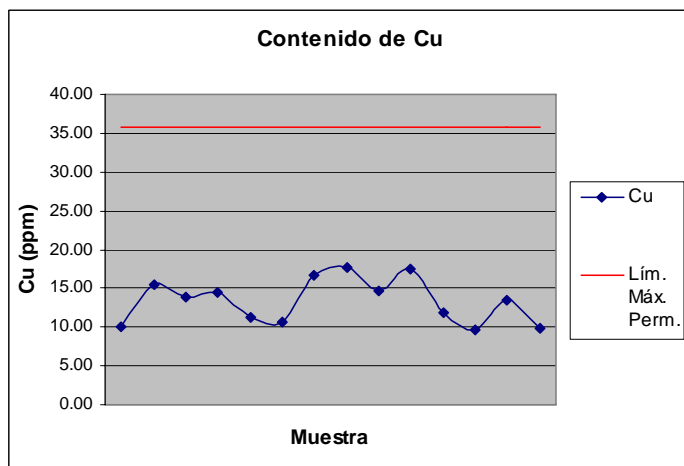


Figura A1.15 Niveles de Cu en muestras blanco

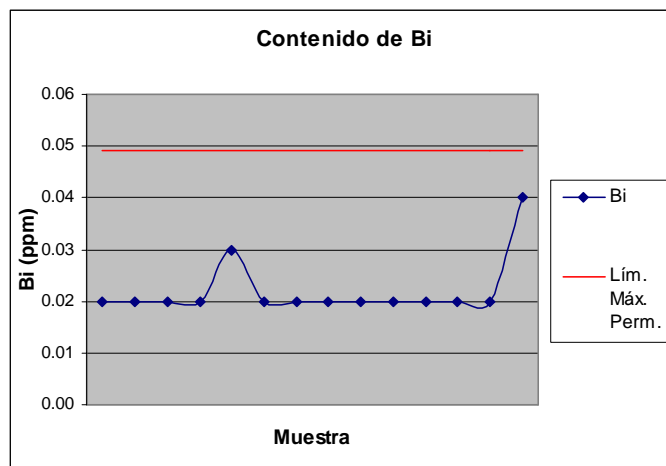


Figura A1.16 Niveles de Bi en muestras blanco



FiguraA1.17 Niveles de Zn en muestras blanco

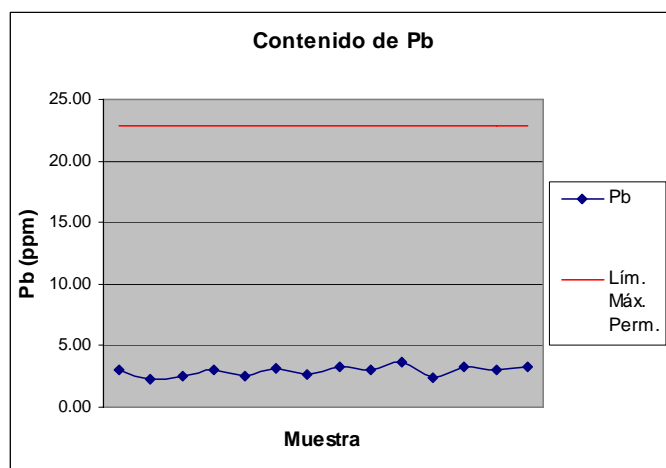


Figura A1.18 Niveles de Pb en muestras blanco

ANEXO 2 MAPAS ISOVALÓRICOS DE DISTRIBUCIÓN

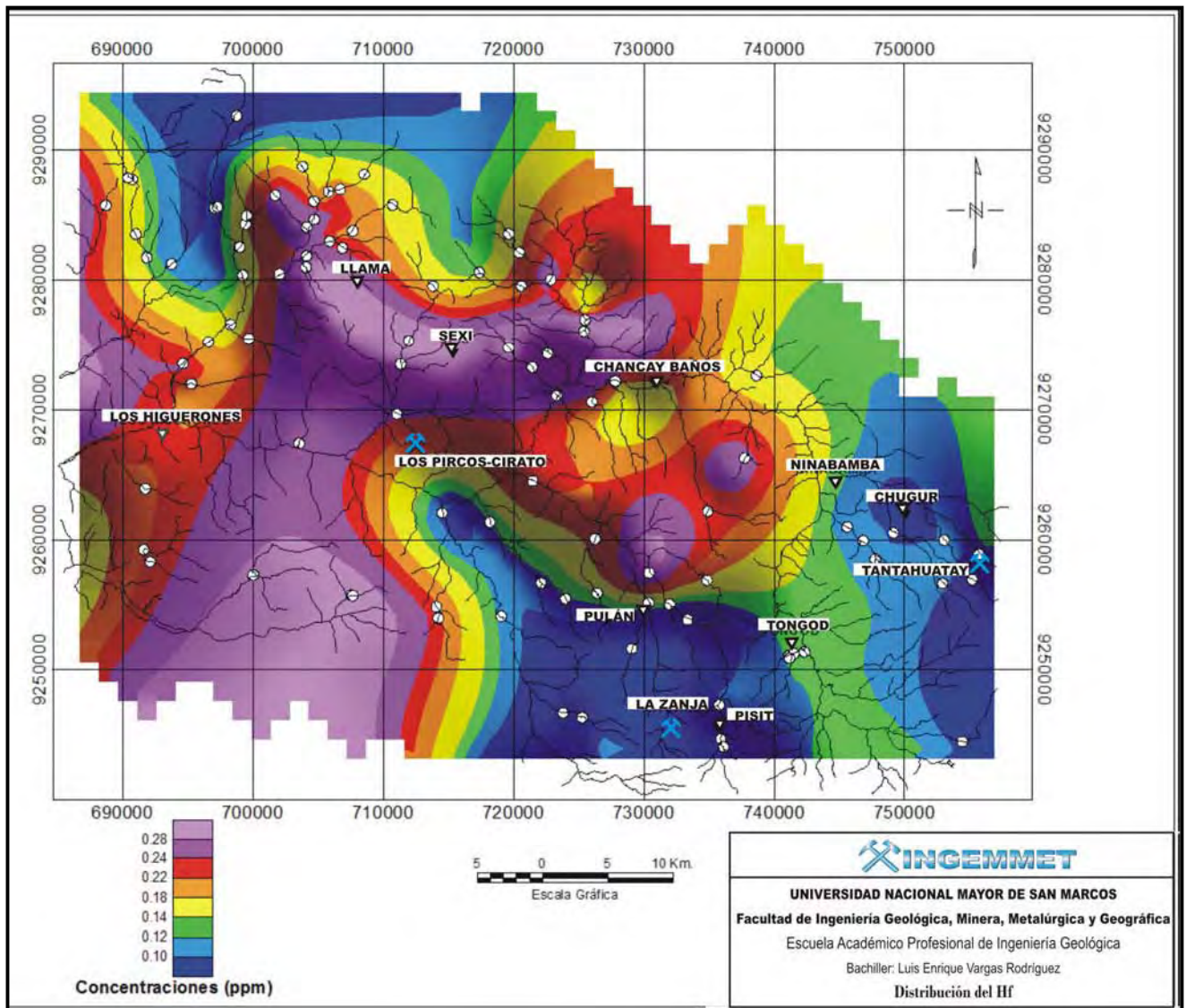


Figura A2.1 Mapa Isovalórico del Hf

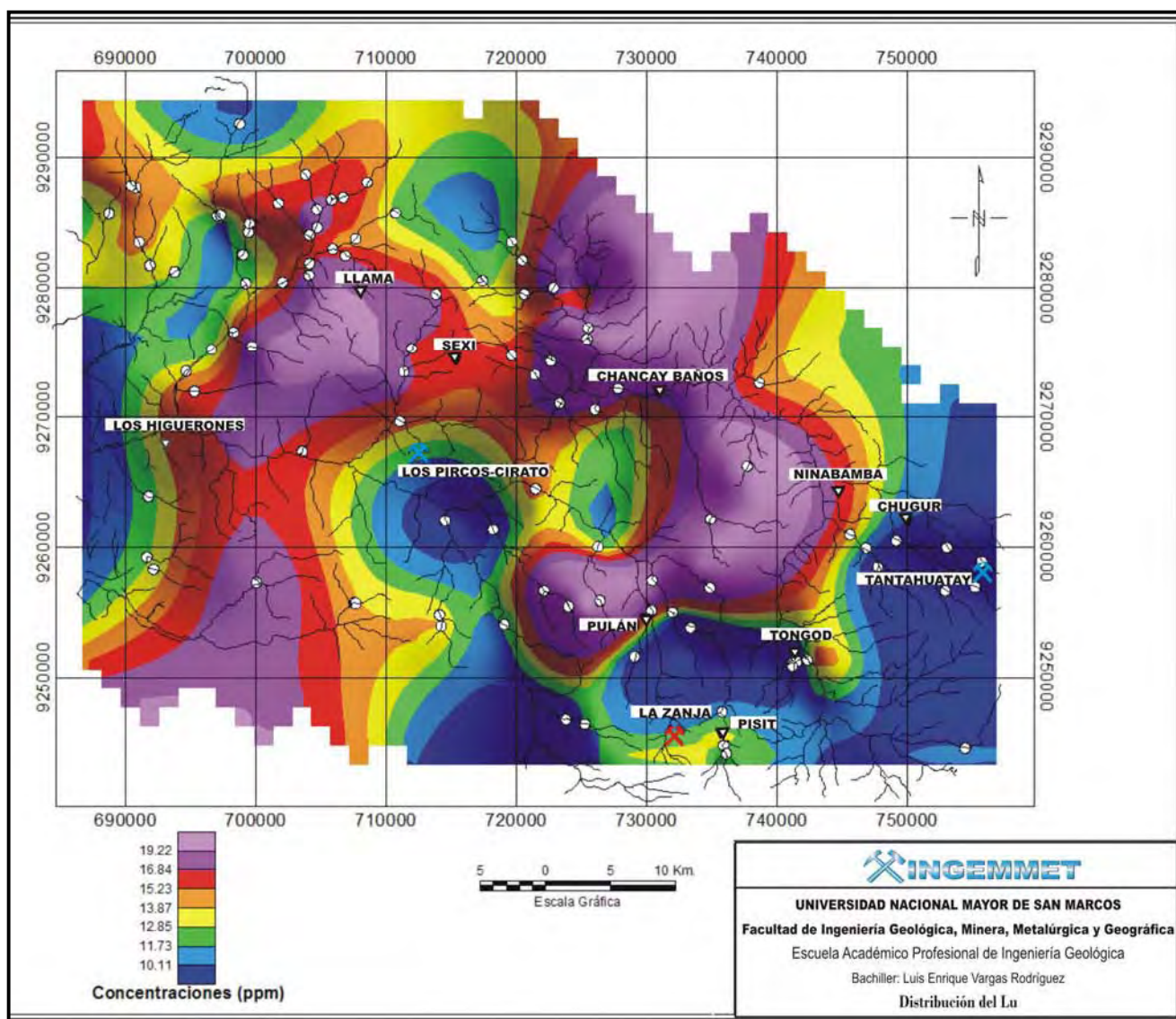


Figura A.2.2 Mapa Isovalórico del Lu

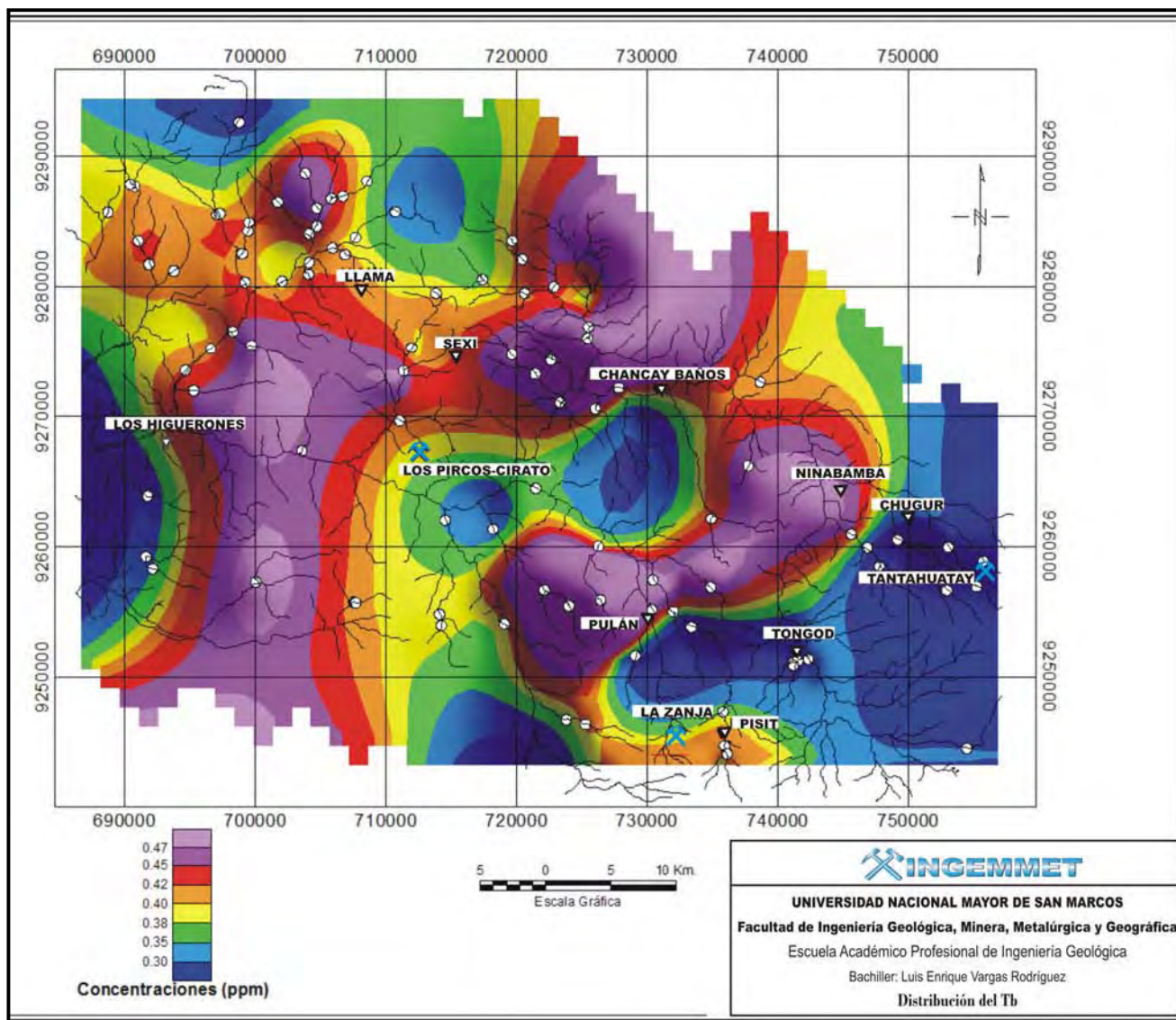


Figura A.2.3 Mapa Isovalórico del Tb

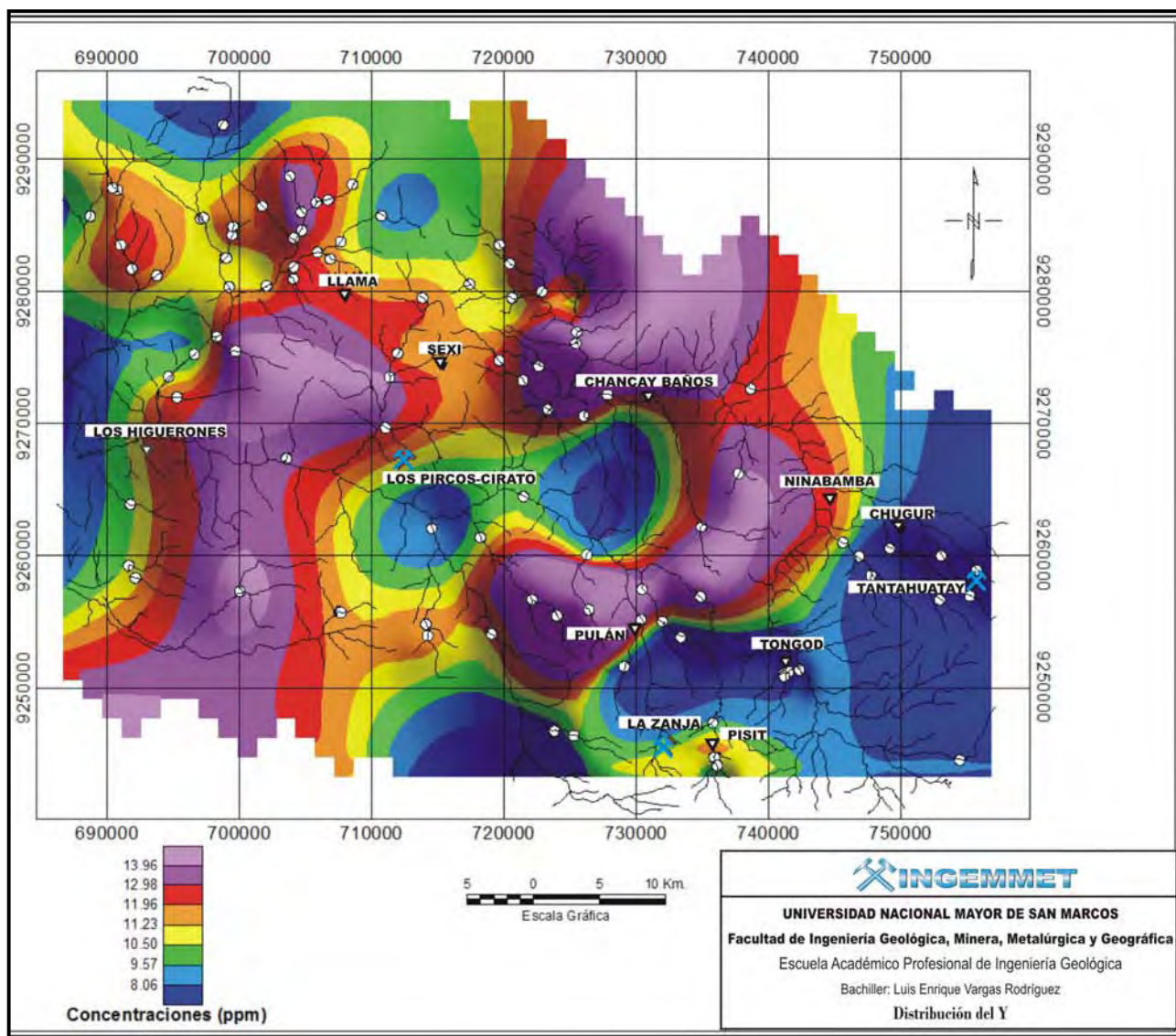


Figura A.2.4 Mapa Isovalórico del Y

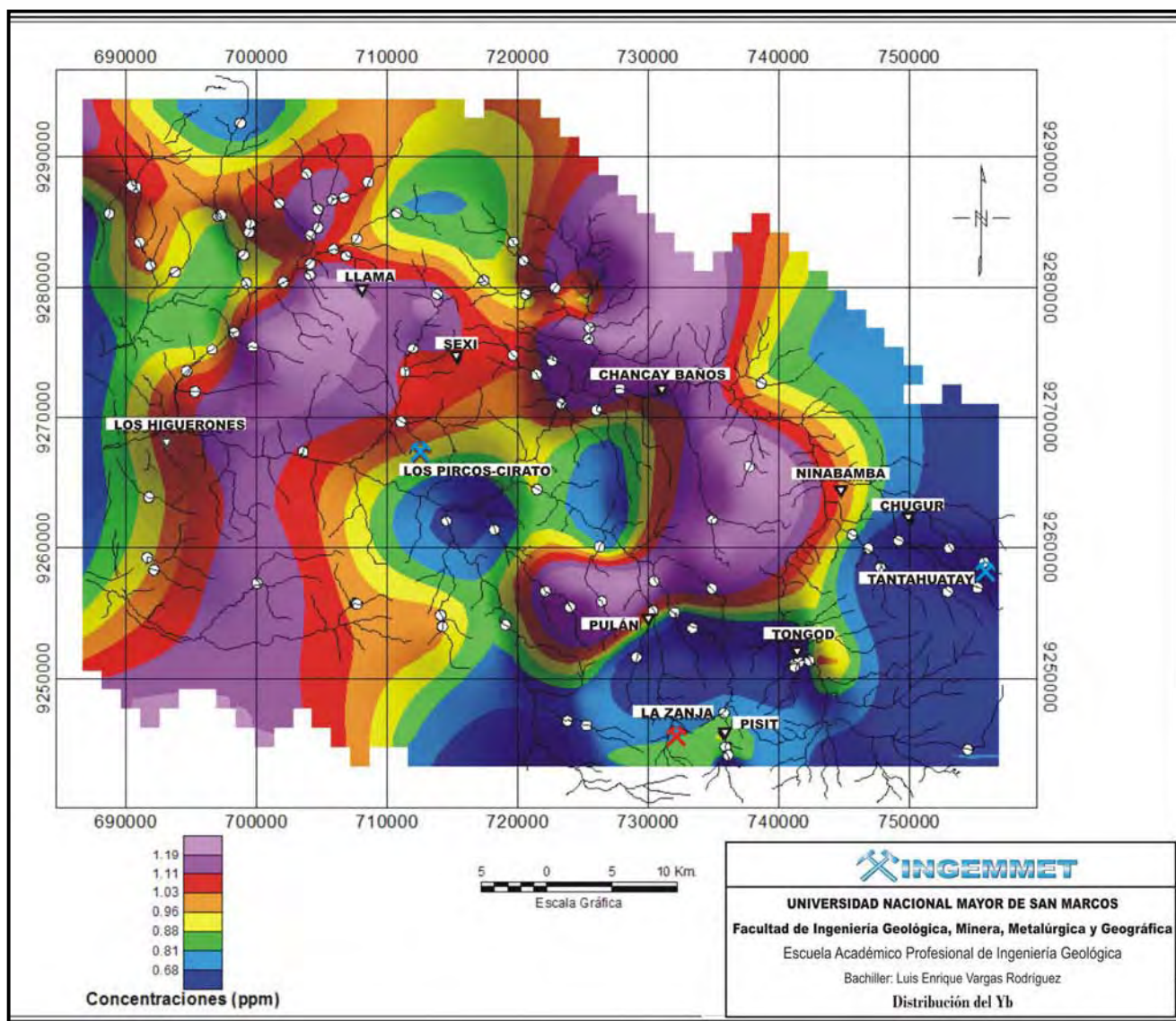


Figura A.2.5 Mapa Isovalórico del Yb

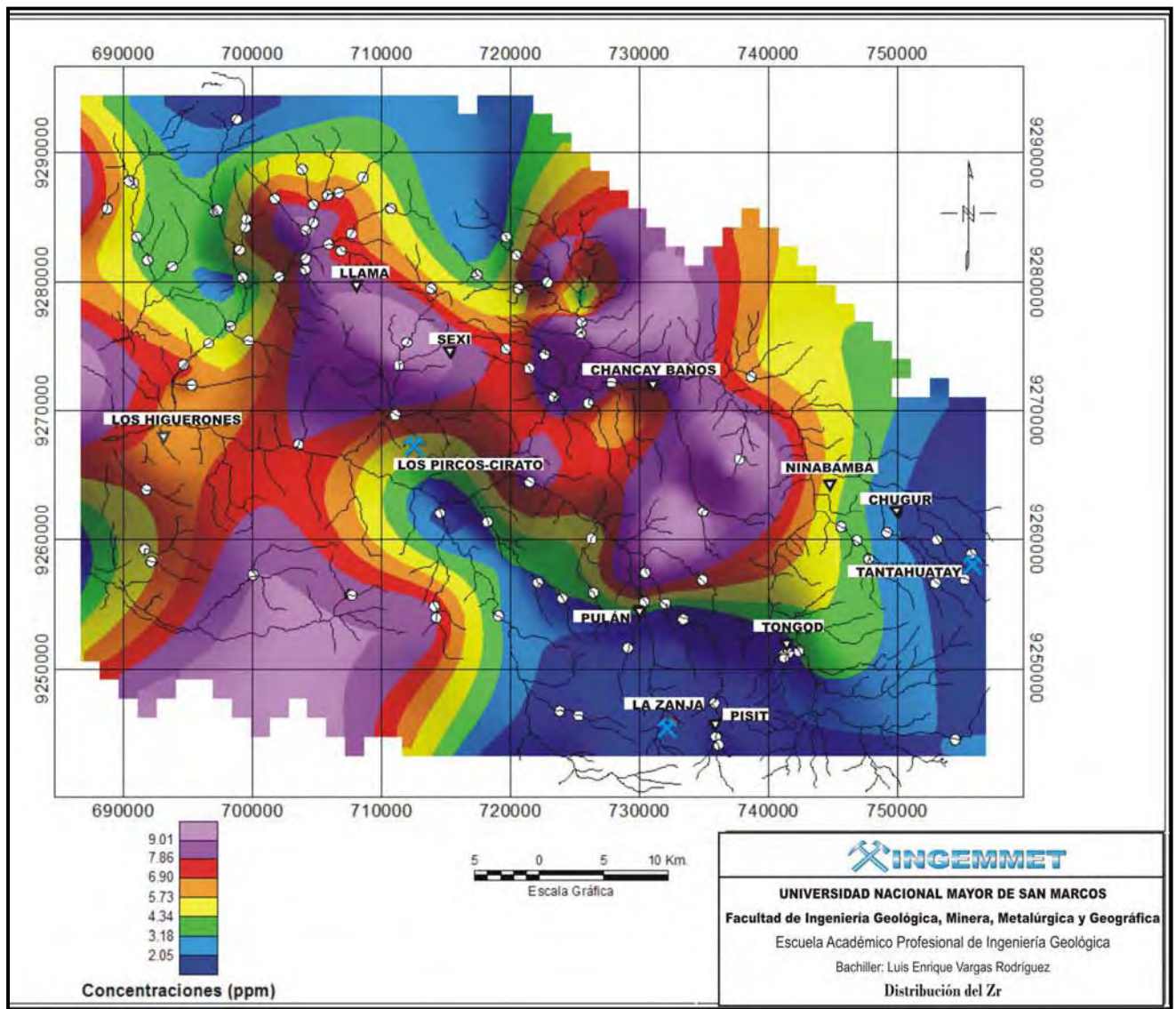


Figura A.2.6 Mapa Isovalórico del Zr

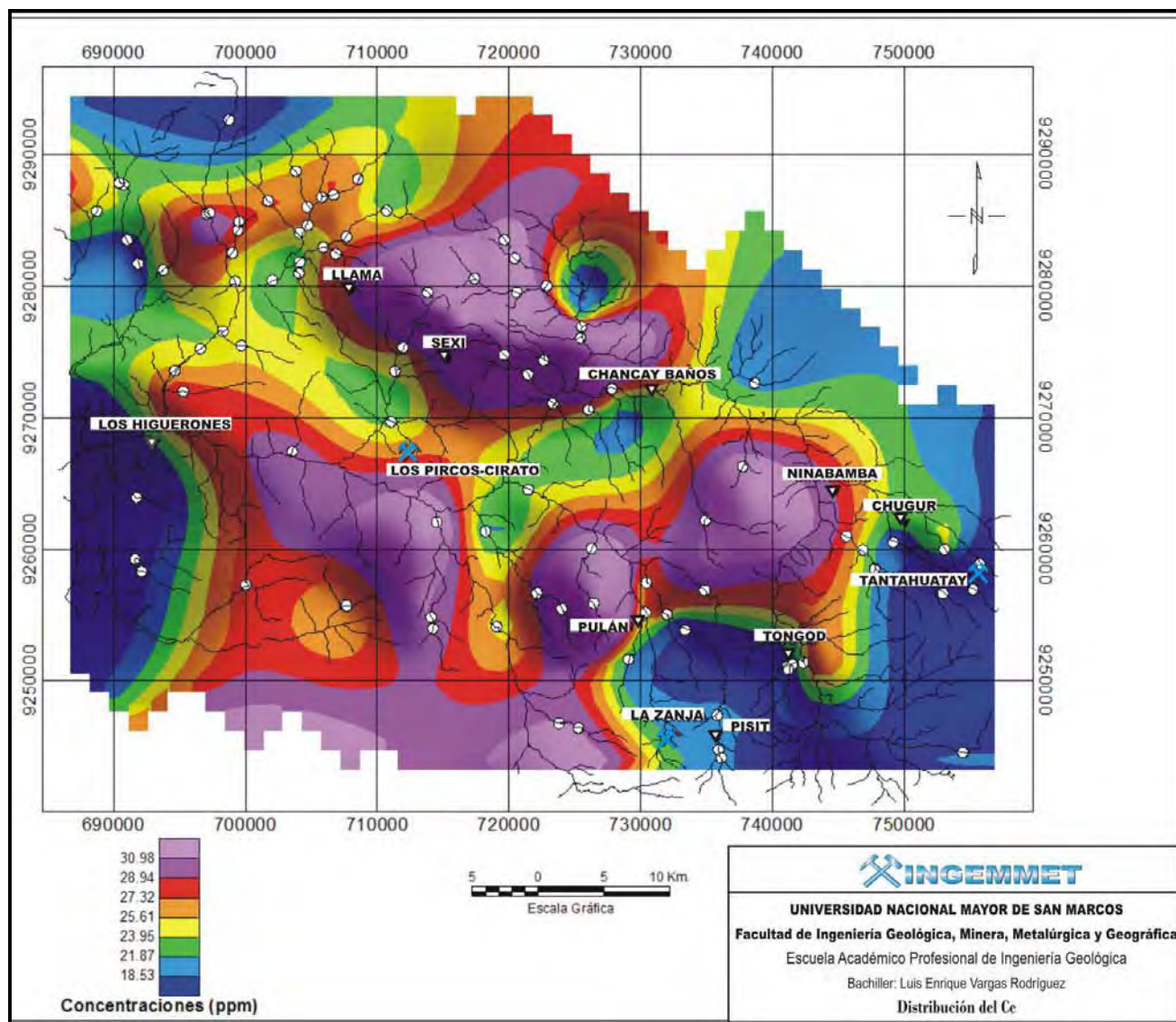


Figura A.2.7 Mapa Isovalórico del Ce

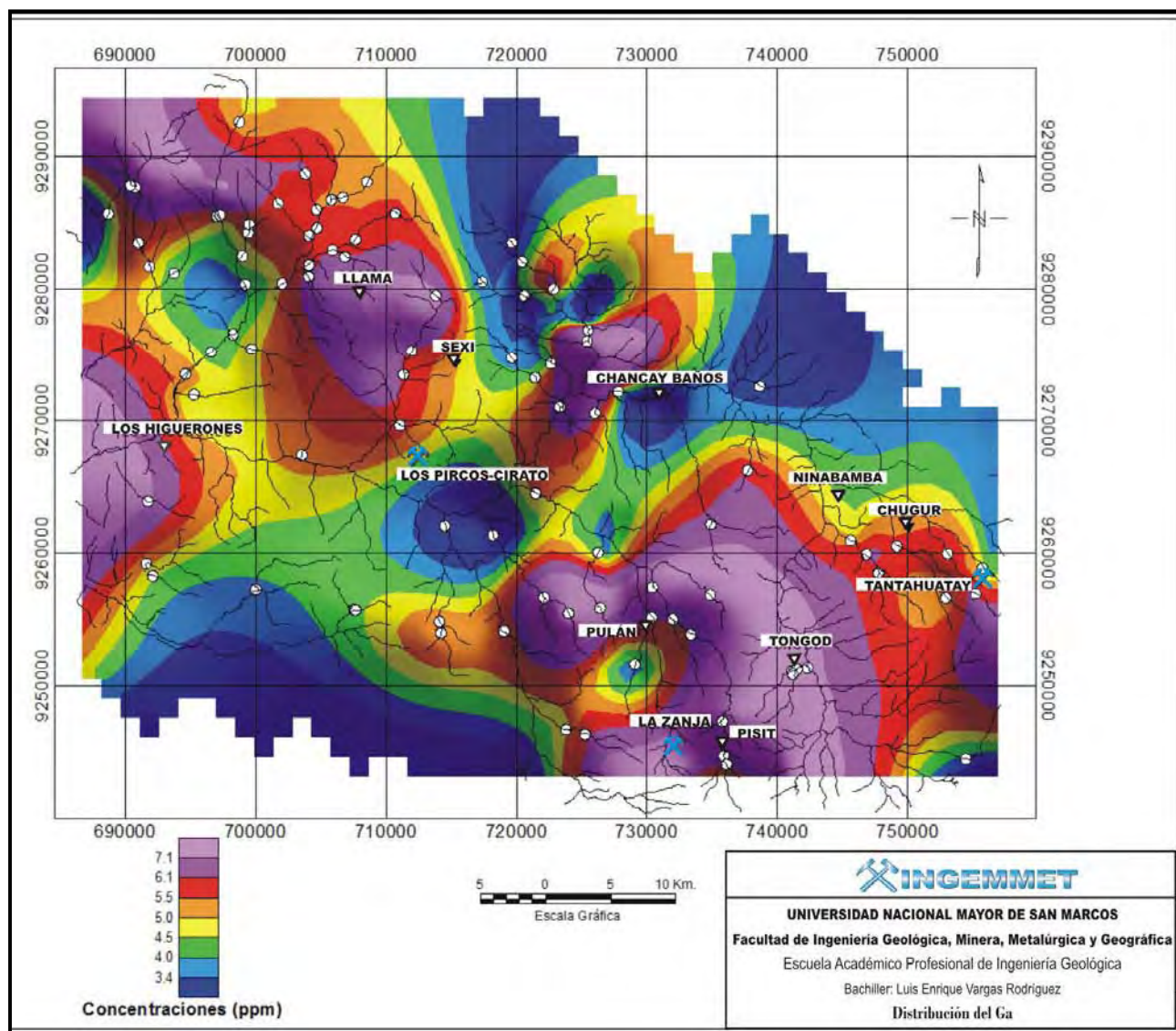


Figura A.2.8 Mapa Isovalórico del Ga

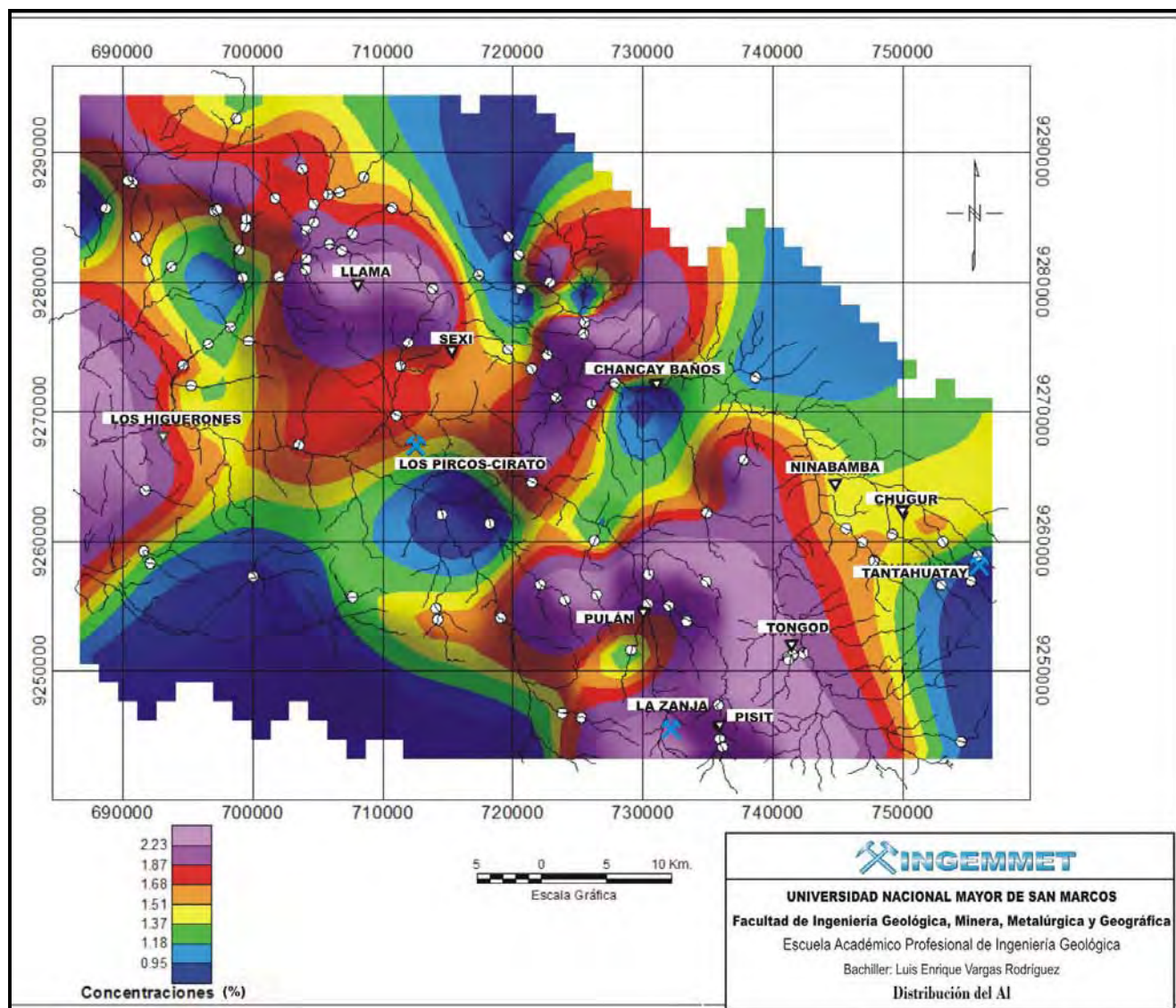


Figura A.2.9 Mapa Isovalórico del Al

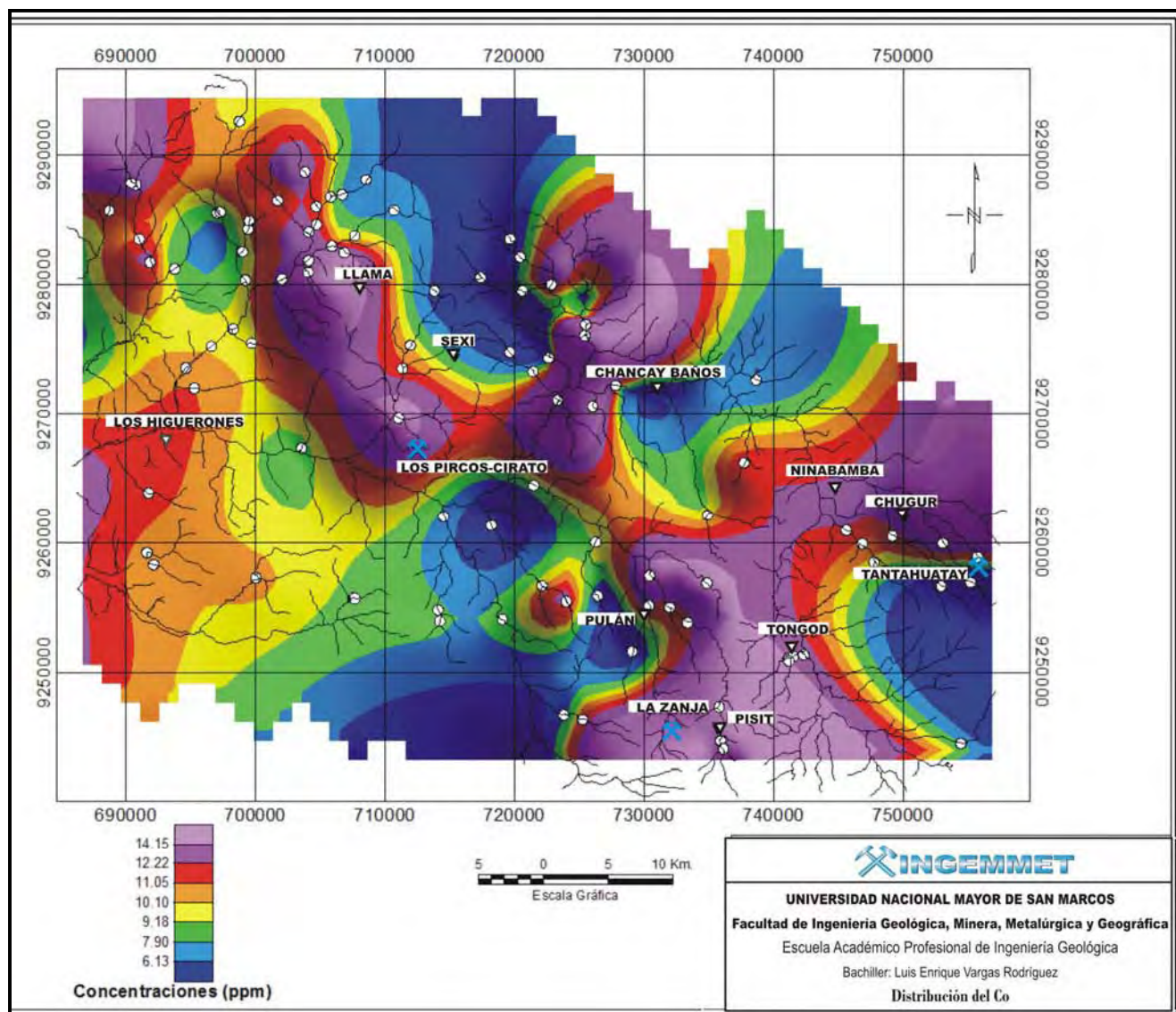


Figura A.2.10 Mapa Isovalórico del Co

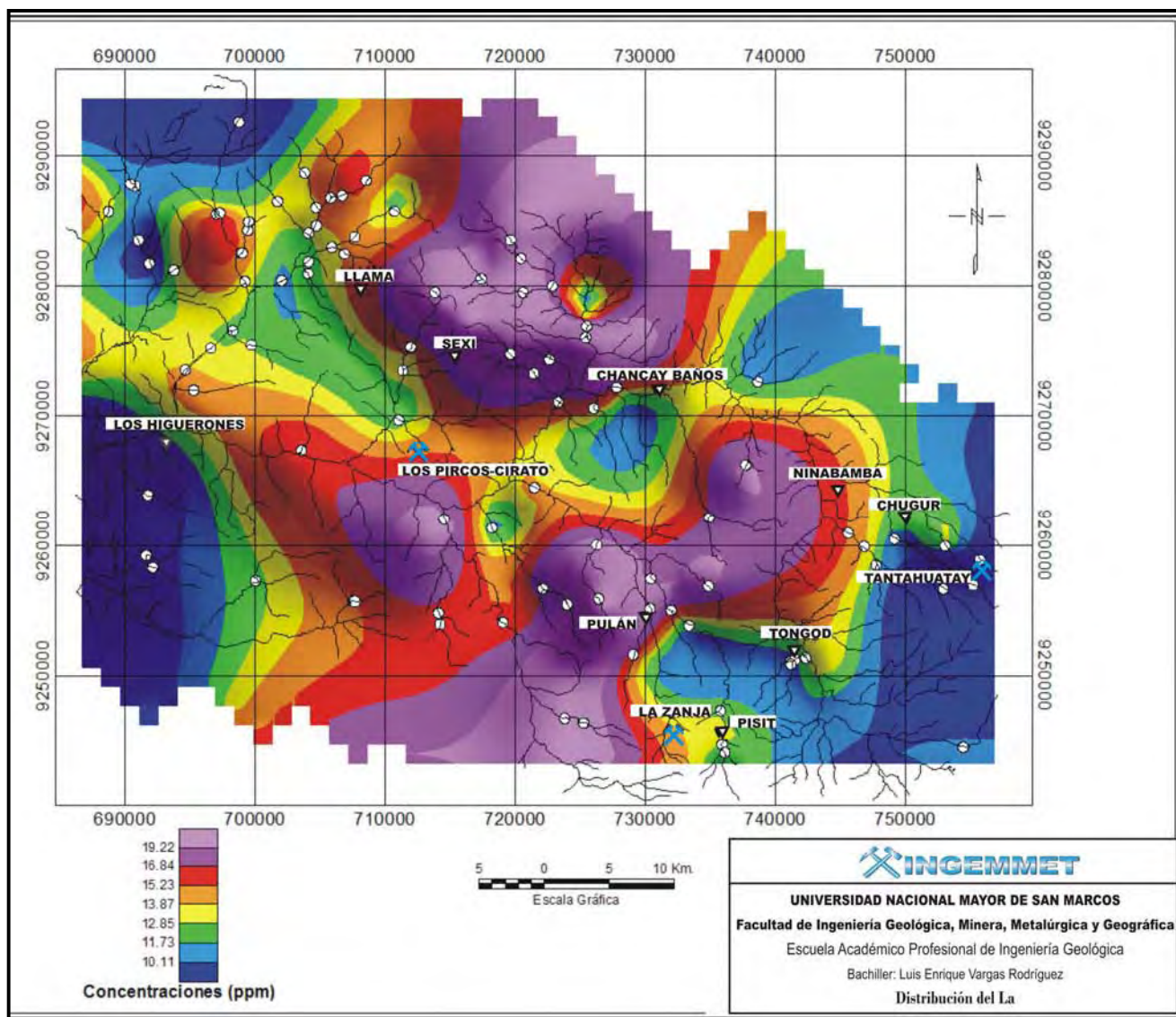


Figura A.2.11 Mapa Isovalórico del La

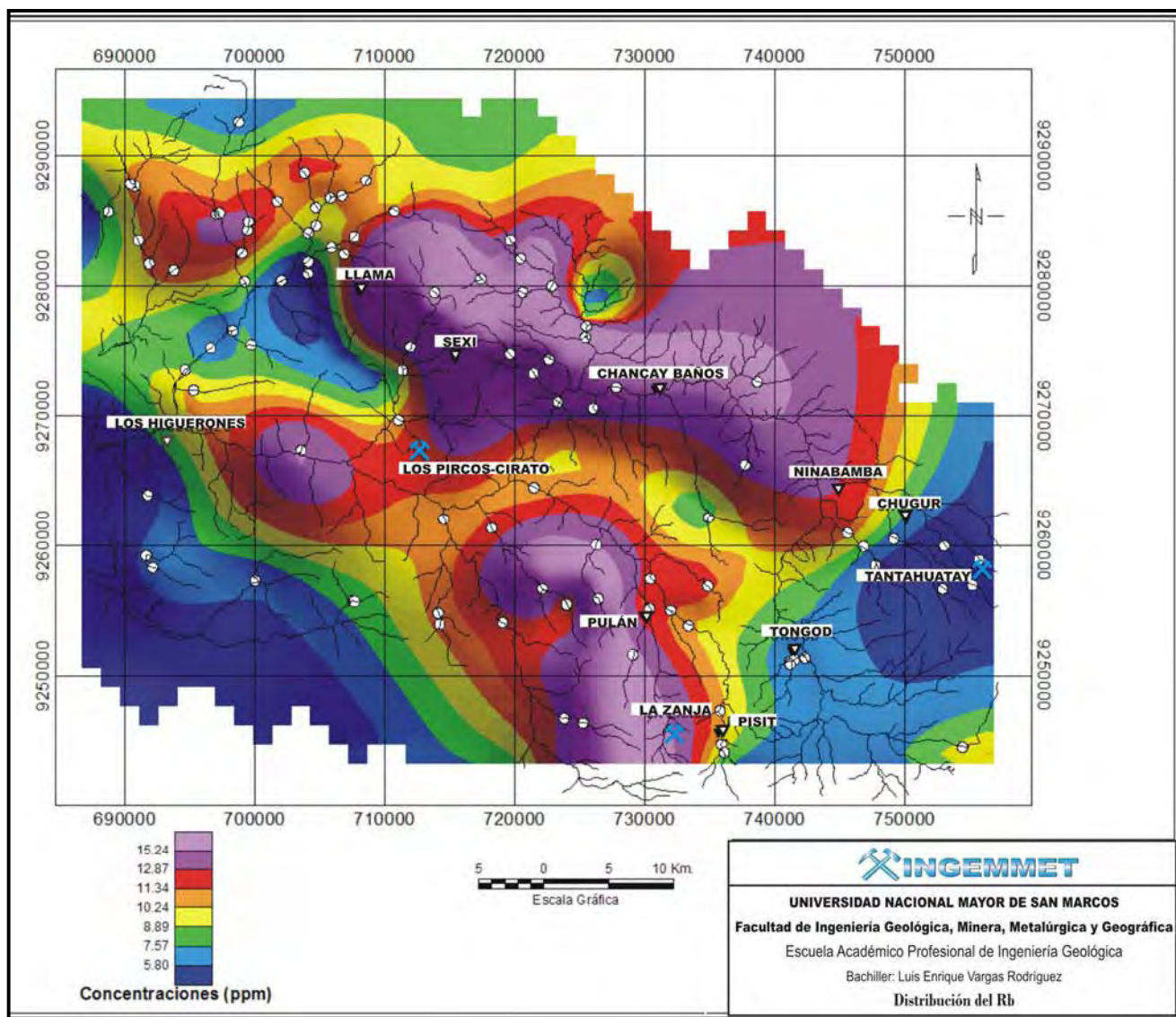


Figura A.2.12 Mapa Isovalórico del Rb

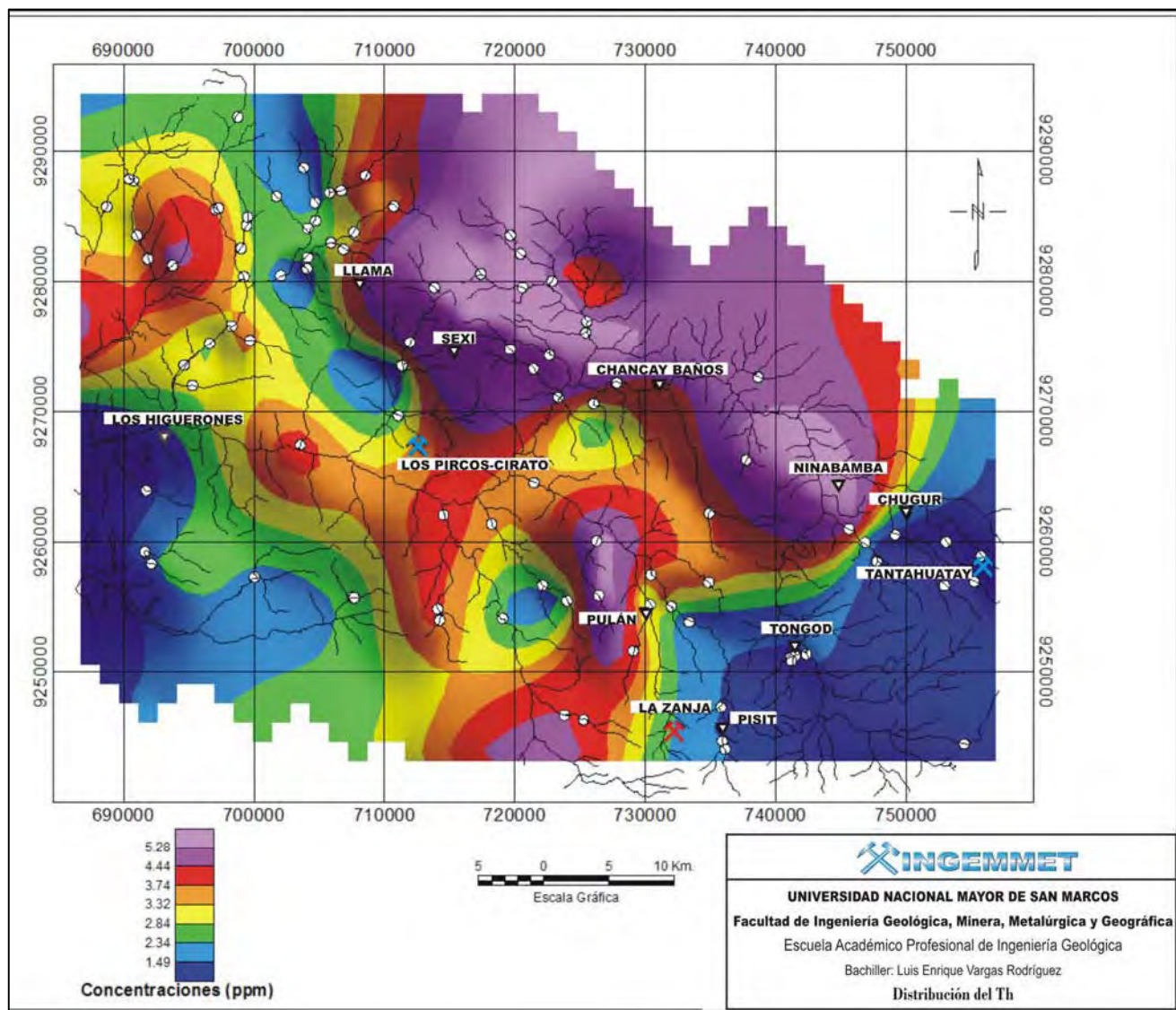


Figura A.2.13 Mapa Isovalórico del Th

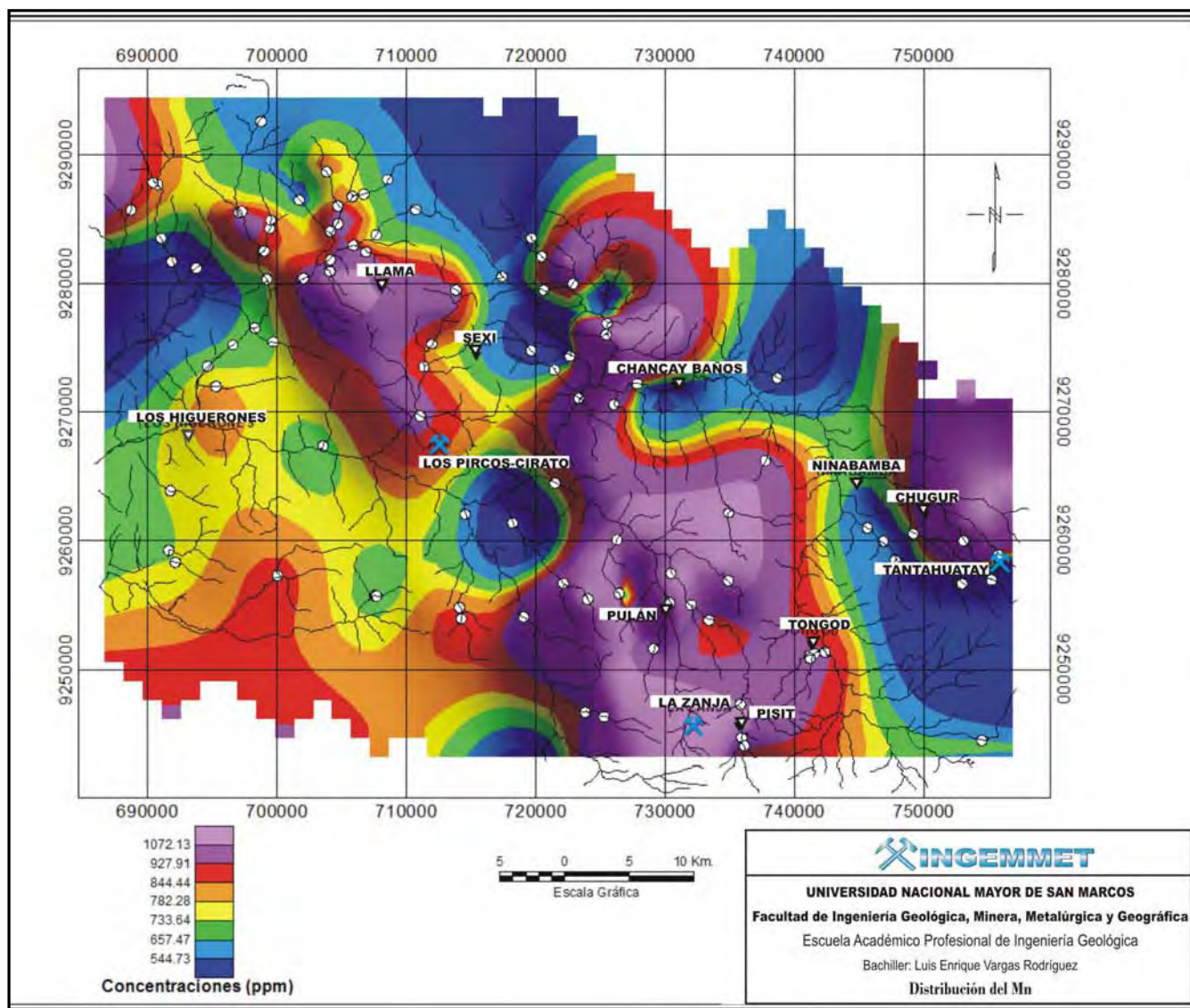


Figura A.2.14 Mapa Isovalórico del Mn

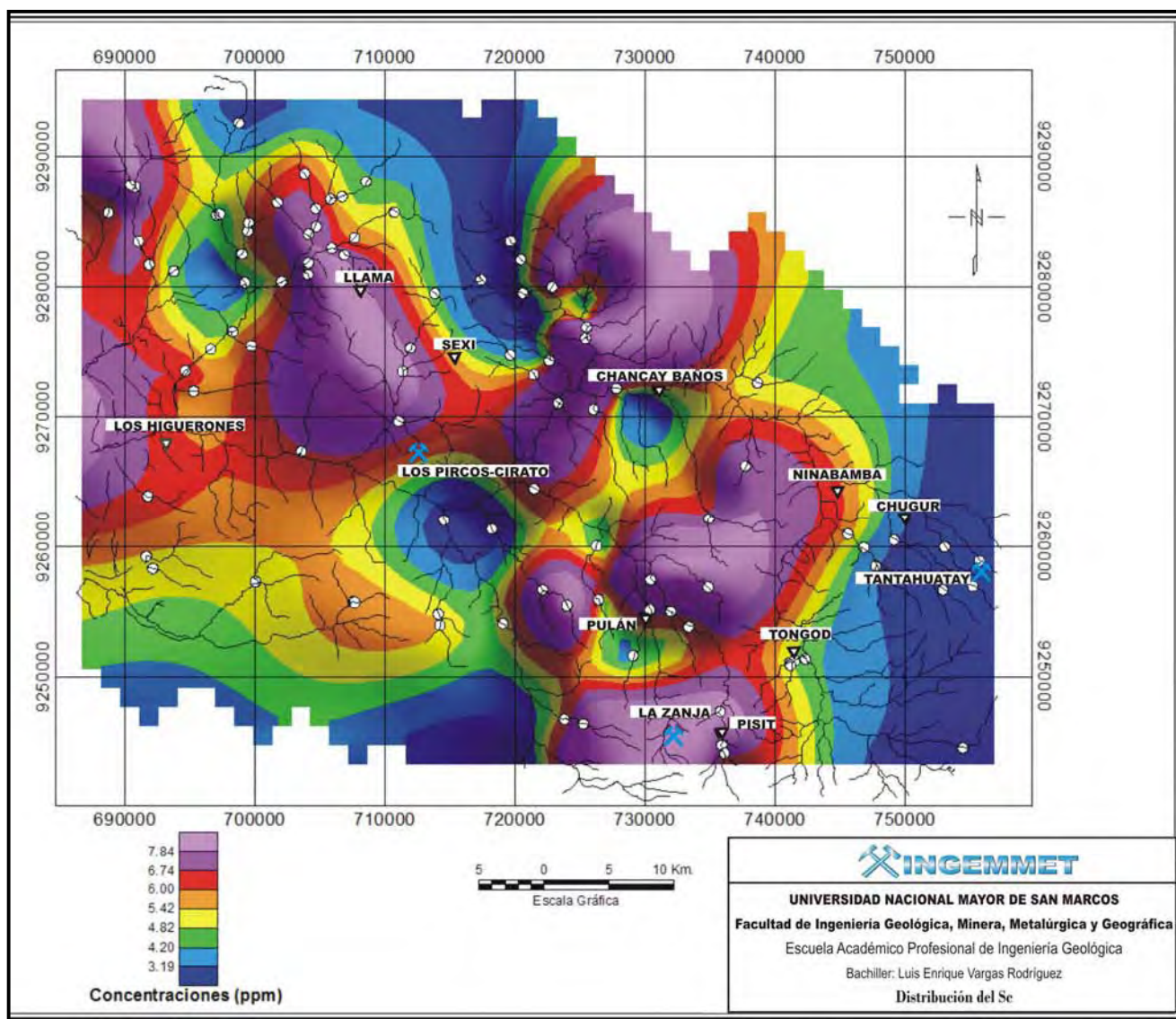


Figura A.2.15 Mapa Isovalórico del Sc

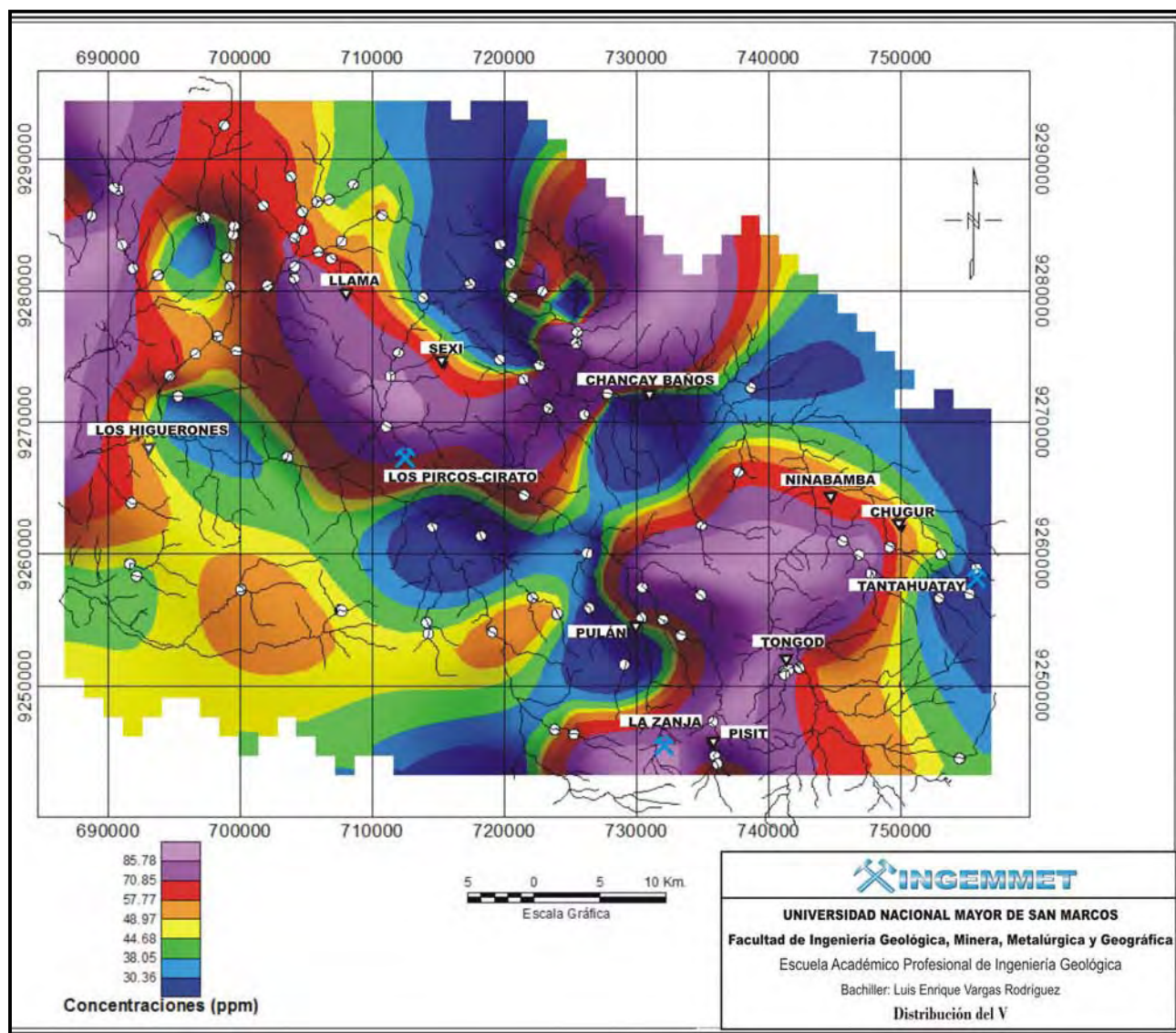
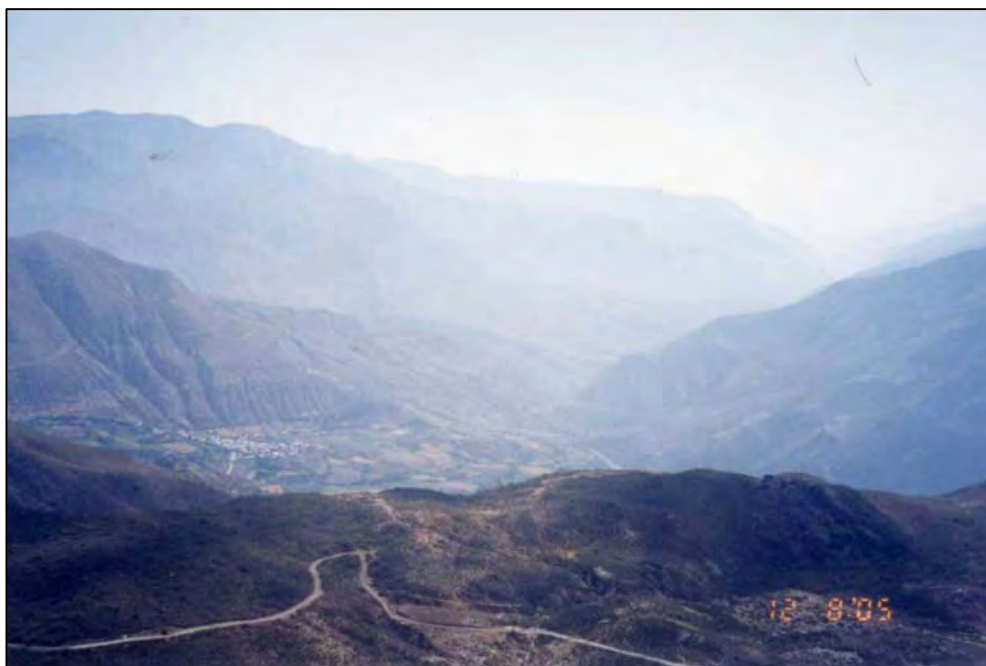


Figura A.2.16 Mapa Isovalórico del V

ANEXO 3 FOTOGRAFÍAS DE CAMPO



FOTOGRAFÍA A3.1 Valle del río Chancay en las inmediaciones de Catache, vista hacia el sur oeste.



FOTOGRAFÍA A3.2 Morfología suave de las tobas del Volcánico Huambos en el yacimiento La Zanja, vista mirando al norte



FOTOGRAFÍA A3.3 Drenaje ácido de roca en la quebrada Tantahuatay, afluente del río Chancay-Lambayeque, 6 km al SE de Chugur.



FOTOGRAFÍA A3.4 Drenaje ácido de roca en la quebrada Huamboyo, 6 km al sur de Huambos.



FOTOGRAFÍA A3.5 Valle encañonado del río Cañad, afluente del río Chancay-Lambayeque, a la altura de la quebrada de Succhupampa. Vista al sur este.



FOTOGRAFÍA A3.6 Morfología típica y fuerte oxidación de las tobas del Volcánico Huambos a 12 km. al oeste del Distrito del mismo nombre, vista al NE.

ANEXO 4 GLOSARIO

Afinidad Geoquímica.- Se entiende por afinidad geoquímica de un elemento al conjunto de aquellas de sus propiedades que determinan su distribución observada o supuesta.

Anomalía Geoquímica.- Tradicionalmente se define como el valor por encima del Threshold, las anomalías relacionadas a mineralización y que pueden por lo tanto ser utilizadas como guía en la prospección, se denominan anomalías significativas. Las anomalías que no están relacionadas a mineralización, se denominan anomalías no significativas.

Asociación Geoquímica.- Es la agrupación geoquímica de dos o más elementos, estas asociaciones reflejan ambientes específicos y procesos formadores de minerales. Es un factor muy importante en la geoquímica aplicada tanto en prospección como estudios ambientales.

Background.- Es el “valor normal” o de “fondo” del material de un ambiente geológico, geomorfológico y geoquímico determinado.

Dispersión Geoquímica".- Es la capacidad de migración de un elemento desde su origen hacia otro ambiente a través de diferentes procesos fisicoquímicos y mecánicos.

Pathfinder.- Se le define como un elemento fácilmente detectable, el cual puede ser usado como guía para ubicar la presencia de un elemento económicamente más deseable, el cual es difícil de detectar por problemas analíticos, su detección es costosa y esta ausente en el material que esta siendo muestreado debido a la movilidad diferencial del elemento buscado.

Patrón de Dispersión Geoquímica Secundaria.- Sus características son consecuencias naturales de los procesos dinámicos de dispersión, estos procesos y el amplio rango de ambientes en el cual operan son complejos. Genéticamente pueden ser clasificados como singenéticos o epigenéticos en función al tiempo deformación con respecto a la matriz huésped. Según su modo de formación se pueden clasificar como: clástico, hidromórfico o biogénico.

Threshold.- Se define como los límites de fluctuación local y regional del valor normal, viene a ser un límite superior de la fluctuación del background normal.